

Thomas Glotzbach

**Ein Beitrag zur Steuerung von mobilen Systemen
auf Grundlage der Bioorientierten Adaptiven
Autonomie**

Ein Beitrag zur Steuerung von mobilen Systemen auf Grundlage der Bioorientierten Adaptiven Autonomie

Von Thomas Glotzbach



Universitätsverlag Ilmenau
2010

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Informatik und Automatisierung der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 16. Februar 2009

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Wernstedt
(Fraunhofer-Anwendungszentrum für Systemtechnik AST, Ilmenau)

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph Ament
(Technische Universität Ilmenau)

3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Cuno
(Hochschule Fulda)

Tag der Verteidigung: 13. August 2009

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

www.mv-verlag.de

ISBN 978-3-939473-68-8 (Druckausgabe)

urn:nbn:de:gbv:ilm1-2009000324

Titelfoto: photocase.com

Danksagung

So wie bei der Kooperation zwischen unbemannten mobilen Systemen das Entstehen von Systemsynergien und neuen Fähigkeiten angestrebt wird, entsteht auch eine Dissertation zumeist in einem kooperativen Umfeld. Der Promovent hat mit der Dissertationsschrift einen Nachweis seiner Fähigkeit zu vertiefter selbständiger wissenschaftlicher Arbeit zu führen. Dem geht voraus, diese Fähigkeit zu entwickeln, was zum einen das Vorhandensein sehr guter Lehrer voraussetzt, die Teile ihrer Erfahrungen weitergeben. Zum anderen ist ein kooperatives, kollegiales Arbeitsumfeld notwendig, in welchem der Promovent seine Ideen in Diskussionen und Experimenten entwickeln und weiterentwickeln kann. Wird dies alles noch durch ein unterstützendes privates Umfeld abgerundet, sind optimale Voraussetzungen für den Promoventen gegeben, sein anspruchsvolles Ziel zu erreichen. Nach erfolgreichem Abschluss ist es deshalb selbstverständlich, Worte des Dankes an die Personen zu richten, ohne welche die vorliegende Arbeit nicht in dieser Form hätte entstehen können.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Wernstedt danke ich nicht nur für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit, sondern auch für die Vielzahl an Erfahrungen, welche ich während der Zusammenarbeit an der Technischen Universität Ilmenau und dem Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik Ilmenau im Rahmen von meiner Tätigkeit in Industrie- und Forschungsprojekten von ihm übernehmen konnte. Seiner Einsatzbereitschaft und seinem Durchsetzungsvermögen ist es außerdem zu verdanken, dass das interessante Forschungsgebiet der unbemannten mobilen Systeme in unterschiedlichen Einsatzszenarien an den genannten Forschungsinstitutionen in Ilmenau etabliert werden konnte und jungen Nachwuchswissenschaftlern anspruchsvolle und ansprechende Projekt- und Forschungsthemen bietet.

Bei Prof. Dr.-Ing. Bernd Cuno lernte ich an der Fachhochschule Fulda (heute Hochschule Fulda) die Grundlagen der Regelungs- und Automatisierungstechnik. Seine engagierten und ansprechenden Lehrveranstaltungen weckten mein Interesse an diesem Forschungsgebiet. Seiner Vermittlung an die Technische Universität Ilmenau verdanke ich es, dass ich das Erlernte in einem anspruchsvollen Umfeld anwenden konnte.

Herrn Dr.-Ing. Andreas Wenzel, Herrn Dr.-Ing. Torsten Pfützenreuter, Herrn Dr.-Ing. Divas Karimazira und meiner Mutter, Frau Erika Glotzbach, danke ich für das Korrekturlesen der Arbeit und die wertvollen Diskussionen. Darüber hinaus geht mein Dank an alle Arbeits- und Studienkollegen, mit denen ich im Laufe der Zeit in verschiedenen Projekten zusammenarbeiten durfte und welche auf vielfältige Art zu meiner wissenschaftlichen Prägung beigetragen haben.

Meiner Mutter Erika und meinem Vater Bernhard Glotzbach danke ich generell für Ihre ständige Unterstützung, insbesondere während meines Studiums, aber auch außerhalb.

Zuletzt geht mein größter Dank an meine Frau Birgit. Ohne Ihre Unterstützung, Fürsorge, Geduld und Liebe hätte diese Arbeit nicht fertiggestellt werden können. Ihr möchte ich diese Arbeit daher widmen.

Zusammenfassung

Die Forschung im Bereich mobiler unbemannter Systeme hat in den letzten Jahren ständig an Bedeutung gewonnen. Als Ziel verschiedener Aktivitäten steht dabei häufig das Erlangen von Autonomie im Vordergrund. Unterschiedliche Vorstellungen und Umsetzungen von „Autonomie“ erschweren dabei eine notwendige interdisziplinäre Zusammenarbeit von Spezialisten unterschiedlicher Fachrichtungen.

Die vorliegende Dissertationsschrift schlägt mit der Bioorientierten Adaptiven Autonomie ein neuartiges Verständnis des Begriffes Autonomie vor. Indem Autonomie als variabler Zustand in einem Autonomiespektrum zwischen vollautonom und teleoperiert betrachtet wird, lassen sich alle vorhandenen unterschiedlichen Vorstellungen von Autonomie einordnen und vergleichen. Gleichzeitig beschreibt die Bioorientierte Adaptive Autonomie die Möglichkeit, den Autonomiegrad von Systemen durch einen Softwareadapter während der Missionsausführung ständig den aktuellen Gegebenheiten anzupassen.

Besonders das letztgenannte Kriterium vereinfacht die Beschreibung unterschiedlicher autonomer Systeme deutlich. Unter gegebenen Voraussetzungen kann ein autonomes System trotz seiner Autonomie auf Daten oder Rechenkapazitäten von außerhalb seiner Systemgrenzen zugreifen. Dabei wird herausgearbeitet, dass Entwicklungen in diesem Forschungsbereich nicht das Erlangen eines möglichst hohen Autonomiegrades zum Ziel haben sollten, sondern eines optimal angepassten.

Dazu können die Eingriffsmöglichkeiten eines menschlichen Operators genau klassifiziert werden. Der Mensch kann konkret in die Missionsausführung autonomer Systeme eingebunden werden, wobei seine Befugnisse sowohl von ihm selbst als auch von dem mobilen System nach genau definierten Regeln verändert werden können. Dies ermöglicht eine Vielzahl von notwendigen

Anwendungen: Überwachung durch den Menschen, Eingriff bei unklaren Situationen, welche das mobile System nicht selbständig bewältigen kann, Validierung bzw. Überwachung des Operators durch das System, Entscheidung durch den Menschen bei Einsatz von Systemen mit hohem Gefahrenpotential. Dies ist sehr bedeutsam, da die juristische Verantwortung immer bei einem Menschen liegen muss.

Besonders effizient ist das neuartige Autonomiekonzept bei der Realisierung von kooperierenden Teams aus unbemannten mobilen Systemen. Hier stehen die Zielstellungen ‚Autonomie des einzelnen‘ und ‚Kooperation des Teams‘ im klaren Widerspruch zueinander. Da im Rahmen der Bioorientierten Adaptiven Autonomie die Einzelsysteme ihre Autonomiegrade senken können, kann somit auf verschiedene Art und Weise Teamverhalten erzeugt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden unterschiedliche Umsetzungen von Teams aus unbemannten mobilen Systemen beschrieben und im Rahmen des neuentwickelten Autonomiekonzeptes interpretiert. Dabei werden verschiedene wissenschaftliche Methoden angewandt und verglichen. Als neuartig wird ein hybrider Ansatz mit analytischen, regel- und zustandsbasierten Umsetzungen angegeben. Dieser wird mit alternativen stochastikorientierten Verfahren, welche als Verweise auf weitere Arbeiten des Autors angegeben werden, sowie einem aus der Literatur entnommenen rein analytischen Ansatz verglichen. Ein wertender Vergleich der unterschiedlichen Realisierungsmöglichkeiten wird besonders im Hinblick auf praxistaugliche Anwendungen vorgenommen.

Die vorgestellten Aussagen werden durch verschiedene Simulationen veranschaulicht, welche auch zur Verdeutlichung des Vergleichs der unterschiedlichen Teamstrategien herangezogen werden. Als Ausblick wird auf verschiedene Anwendungsmöglichkeiten hingewiesen, bei welchen gegenwärtig unter Mitarbeit des Autors das beschriebene Autonomiekonzept in die Praxis übertragen wird. Schließlich werden Vorschläge für die weiterführende Forschung im bearbeiteten Themengebiet gemacht.

Abstract

The research in the area of mobile unmanned systems has increasingly gained in importance during the last years. Different activities often aim to realise autonomy. However, there are different conceptions and perceptions of the term ‚autonomy’. This fact complicates the necessary interdisciplinary collaboration between specialists of different scientific fields.

This dissertation thesis suggests a new understanding of the term ‚autonomy’ based on the concept of the Bio-inspired Adaptive Autonomy. This principle defines autonomy as a state in a complete spectrum between (total) autonomous and remote controlled, thus all different existing perceptions and concepts of autonomy can be integrated and compared. Moreover, Bio-inspired Adaptive Autonomy enables the adaptation of the level of autonomy for mobile systems to the current situation, using a software adapter.

Especially the last mentioned criterion clearly simplifies the characterisation of different autonomous mobile systems. If certain conditions are fulfilled, an autonomous system can use data or computing capacity from outside, in spite of being autonomous. This work clarifies that realisations in this scientific field should not tend to reach the highest possible level of autonomy, but the optimal one.

It is possible to accurately classify the possible interventions by a human operator. Respectively, a human can be integrated into the mission execution of autonomous systems. Both the human and the system have the possibilities to change the authority of the human, according to well defined rules. Possible application based on this procedure are: Monitoring by a human, intervention in unclear situations which cannot be solved by the mobile system, validation and monitoring of the operator by the system, decisions by the human if sys-

tems with a high risk potential are used. This is very important, as in all cases the human has to accept the juristic responsibility.

The novel autonomy concept is very efficient in the realisation of cooperating teams of unmanned mobile systems. There is a clear antilogy between the goals ‚autonomy of the single system’ and ‚cooperation within the team’. As Bio-inspired Adaptive Autonomy allows the single systems to lower their level of autonomy, it is possible to realise team behaviour in different ways.

This thesis describes different realisations of unmanned vehicle teams and interprets them in the framework of the new developed autonomy concept. Different scientific methods are employed and compared. A novel hybrid approach with analytical, rule- and state graph-based realisations is described and compared with alternative stochastic-based realisations, which are stated as reference to further activities by the author. Also a complete analytic approach which was taken from literature is realised and compared. This work gives a judgemental comparison between the different realisations with special regard to practicable applications.

Different simulations are employed to exemplify the statements made. They are also used to clarify the comparisons between the different team strategies. The thesis concludes with an outlook on different possible applications which are currently under development and used by the author to transfer the new autonomy concept into praxis. Eventually, suggestions are made for continuative research activities in the research area of autonomous mobile systems.

Inhalt

Danksagung	v
Zusammenfassung.....	vii
Abstract.....	ix
Inhalt	xi
Abbildungsverzeichnis.....	xv
Tabellenverzeichnis.....	xxv
Abkürzungen.....	xxvii
1 Einleitung.....	1
1.1 <i>Einführung in die Thematik mobile Roboter und unbemannte Fahrzeuge</i>	<i>1</i>
1.2 <i>Aufbau der Arbeit.....</i>	<i>5</i>
2 Aktuelle Forschung und Stand der Technik.....	7
2.1 <i>Forschungsaktivitäten im Bereich mobiler autonomer Systeme</i>	<i>9</i>
2.2 <i>Übersicht über die wichtigsten Technologien im Bereich der mobilen Systeme.....</i>	<i>12</i>
2.2.1 Sensorik.....	13
2.2.2 Kommunikation.....	24
2.2.3 Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS)	28
2.2.4 Software	33

2.3	<i>Vorstellung ausgewählter mobiler Systeme</i>	40
2.4	<i>Zielstellung der Arbeit</i>	47
3	Ableitung des neuen Konzeptes der Bioorientierten Adaptiven	
	Autonomie	55
3.1	<i>Definition und Struktur der Bioorientierten Adaptiven</i> <i>Autonomie</i>	56
3.2	<i>Bioorientierte Adaptive Autonomie unter regelungstechnischen</i> <i>Aspekten</i>	60
3.3	<i>Entwurf und Realisierung des Adapters</i>	64
3.4	<i>Bioorientierte Adaptive Autonomie in Roboterteams</i>	71
3.5	<i>Zusammenfassende Wertung</i>	75
4	Grundsätzliche Teamstrategien	77
4.1	<i>Das mobile System „MauSI 2“</i>	78
4.1.1	Bewegungsmodell	80
4.1.2	Sensormodell	83
4.2	<i>Autonomes Fahren eines „MauSI 2“-Systems</i>	88
4.2.1	Prinzipielle Realisierung	89
4.2.2	Erweiterung für komplexere Aufgaben	102
4.3	<i>Rudelverhalten von drei „MauSI 2“-Systemen</i>	106
4.3.1	Erweiterung des Steuerkonzeptes	106
4.3.2	Höhergestelltes Steuersystem und adaptive Autonomie....	110
4.3.3	Realisierung des vorgeschlagenen Konzeptes	112
4.3.4	Zusammenfassende Wertung des hybriden Ansatzes	124
4.4	<i>Schwarmverhalten von biologischen und technischen Systemen</i>	126
4.5	<i>Analytischer Ansatz zur Beschreibung des Teamverhaltens</i>	131
4.5.1	Modellierung eines Fahrzeugteams als Flüssigkeitstropfen	133

4.5.2	Simulationstool	138
4.5.3	Zusammenfassende Wertung	150
4.6	<i>Zusammenfassung und Wertung der unterschiedlichen Konzepte.....</i>	<i>151</i>
5	Beispiele zur Steuerung von Roboterteams	161
5.1	<i>Beispielmission eines Roboterrudels auf dem Land.....</i>	<i>161</i>
5.2	<i>Kooperierendes Verhalten von Teilnehmern im Straßenverkehr</i>	<i>170</i>
5.3	<i>Beispielmission eines Teams autonomer maritimer Fahrzeuge...</i>	<i>179</i>
6	Zusammenfassung und Ausblick	185
6.1	<i>Übertragung der Resultate auf reale Systeme und industrielle Anwendungen.....</i>	<i>185</i>
6.1.1	Das mobile System ASTro.....	186
6.1.2	Übertragung auf industrielle Anwendungen in der maritimen Industrie	188
6.1.3	Übertragung auf industrielle Anwendungen an Land.....	192
6.2	<i>Zusammenfassende Wertung und Ausblick</i>	<i>195</i>
	Literaturangaben	207

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Die FIRA-MiroSot League	16
Abbildung 2-2: Über dem Spielfeld aufgehängte Kameras dienen der Positionsbestimmung der Roboter	16
Abbildung 2-3: Farbige Tore und Pfosten dienen der Orientierung in der Robocup Four Legged League	16
Abbildung 2-4: Der Roboter Kurt3D vom Fraunhofer AIS auf den Robocup German Open 2005	20
Abbildung 2-5: Von der DARPA angestrebte Entwicklungs-Routemap [Dar05]	21
Abbildung 2-6: Aufnahme einer Wärmebildkamera (Bild zu Verfügung gestellt vom Fraunhofer AST Ilmenau)	23
Abbildung 2-7: Digitaler Transceiver auf einem mobilen System	26
Abbildung 2-8: Digitaler Transceiver als Basisstation	26
Abbildung 2-9: Akustik-Modem der Firma EvoLogics zur Kommunikation unter Wasser [Ban+06]	27
Abbildung 2-10: Eingangshindernis beim RoboCup Rescue-Wettbewerb bei den German Open 2005 in Paderborn	30
Abbildung 2-11: Die Steuerung von mobilen Systemen durch den Menschen: Der Mensch in der ethischen und juristischen Verantwortung	33
Abbildung 2-12: Die verschiedenen Roboterparadigmen (aus [Ewa05])	35

Abbildung 2-13: Das Rational Behaviour Model (aus [Pfü05])	36
Abbildung 2-14: Softwarearchitektur des AUVs <i>DeepC</i> , Auszug (aus [Pfü05])	37
Abbildung 2-15: „MauSI“-Roboter in Formation	38
Abbildung 2-16: Abstraktes Beispiel für Emergenz	38
Abbildung 2-17: Nachstellung des "Bullaugen-Problems"	39
Abbildung 2-18: Das Robotersystem Mustang F01 (Bild zu Verfügung gestellt vom Fraunhofer AST Ilmenau)	41
Abbildung 2-19: Das Fahrzeug IDD [Sch+97]	44
Abbildung 2-20: Zwei Mars-Rover, links der Mobile Instrument Deployment Device (MIDD), rechts der Rocky VII vom Jet Propulsion Laboratory der NASA [SRR00]	45
Abbildung 2-21: Das unbemannte maritime Fahrzeug <i>SeaOtter</i>	46
Abbildung 2-22: Der SeaOtter im Einsatz	46
Abbildung 3-1: Der Gesamtbereich bei der Bioorientierten Adaptiven Autonomie	56
Abbildung 3-2: Einbindung des Menschen zur Führung mobiler teilautonomer Systeme	58
Abbildung 3-3: Aufbau der Steuerung eines mobilen Systems als Kaskadenregelung	61
Abbildung 3-4: Höher autonomes mobiles System	62
Abbildung 3-5: Nicht autonomes System	62

Abbildung 3-6: Mögliche Zuordnungen von Einschränkungsfaktoren zu Autonomiegraden	65
Abbildung 3-7: Beispiel für die Organisation eines Autonomieadapters mit diskreten Ausgängen	67
Abbildung 3-8: Realisierung eines Autonomieadapters als Fuzzy-System	68
Abbildung 3-9: Komplettes Flussdiagramm einer ereignisdiskreten Steuerung des Autonomiegrades.....	70
Abbildung 3-10: Autonomiegrad des einzelnen Systems und der Teaminstanz.....	72
Abbildung 3-11: Autonomiekonzept im Team / Verbund.....	73
Abbildung 3-12: Fahrzeugteam als Regelkreis.....	74
Abbildung 4-1: Übersicht über die in diesem Kapitel vorgestellten Verfahren	77
Abbildung 4-2: Mobile Systeme der "MauSI 2"-Klasse.....	79
Abbildung 4-3: Simulation eines "MauSI 2"-Systems in virtueller Realität	79
Abbildung 4-4: Das Bewegungsmodell als Black Box	81
Abbildung 4-5: Translatorische Bewegung eines nicht-holonomen Systems [Brü02].....	81
Abbildung 4-6: Rotatorische Bewegung eines nicht-holonomen Systems [Brü02].....	82
Abbildung 4-7: Struktur des Sensormodells.....	84
Abbildung 4-8: Bedienoberfläche des erweiterten Sensormodells.....	87
Abbildung 4-9: Das Prinzip des virtuellen Zieles [AGW02].....	90

Abbildung 4-10: Schematische Darstellung des Steuerungskonzeptes	91
Abbildung 4-11: Ein- und Ausgänge der verwendeten Fuzzysysteme	92
Abbildung 4-12 a-d: Zugehörigkeitsfunktionen der Ein- und Ausgänge des Fuzzy-Systems zur Zielfahrt.....	93
Abbildung 4-13 a-c: Zugehörigkeitsfunktionen der Eingänge des Fuzzy- Systems zur Hindernisvermeidung.....	96
Abbildung 4-14 a u. b: Zugehörigkeitsfunktionen der Ausgänge des Fuzzy-Systems zur Hindernisvermeidung.....	97
Abbildung 4-15: Struktur der Simulation eines MauSI-Systems (Variablenamen gemäß den Ausführungen in kursiv)	99
Abbildung 4-16 a-f: Ein einzelner MauSI 2-Roboter bei der Zielfahrt.....	101
Abbildung 4-17: Verhalten eines MauSI-Systems bei raumförmigen Hindernissen mit dem einfachen Regelwerk (links) und mit dem modifizierten Regelwerk (rechts)	104
Abbildung 4-18: Spurdarstellung einer gelungenen Raumflucht mit dem modifizierten Fuzzy-System.....	105
Abbildung 4-19: Übersicht über das erweiterte Steuerungskonzept für das Team. Jedes Fahrzeug wird realisiert gemäß den vorherigen Ausführungen (s. auch Abbildung 4-10); lediglich der Block „Missionsplan – Aktuelles reales Ziel“ ist entfernt, da dieses in der neuen Realisierung vom höhergestellten Steuerungssystem vorgegeben wird.....	107
Abbildung 4-20: Steuerungskonzept aus der Sicht des Einzelsystems	108
Abbildung 4-21: Zustandsgraf des höhergestellten Steuerungssystems.....	110

Abbildung 4-22: Struktur der Simulation eines MauSI-Teams (Variablenamen gemäß den Ausführungen in kursiv)	114
Abbildung 4-23: Ablaufplan für den Block "Bewegungsfreigabe"	116
Abbildung 4-24: Struktur des Blockes "Konvoifestlegung"	117
Abbildung 4-25: Ablaufplan für den Block "Zentrale Zielberechnung"	119
Abbildung 4-26 a & b: Erweiterung des Konzeptes in die dritte Dimension ([Sch05])	129
Abbildung 4-27: Direkte (links) und indirekte Kommunikation (rechts)	130
Abbildung 4-28: Das Robotersystem „Robotino“ mit drei omnidirektionalen Rädern.....	133
Abbildung 4-29: Dank drei dieser omnidirektionalen Rädern in einer um jeweils 120 Grad versetzten Anordnung kann der Robotino sich in beiden Flächendimensionen unabhängig bewegen.....	133
Abbildung 4-30: Hindernis mit Projektionsflächen und Fahrzeugen.....	136
Abbildung 4-31: Acht Fahrzeuge im Teamverband	140
Abbildung 4-32: Massenkarambolage beim Ändern der Formation	140
Abbildung 4-33: Acht Fahrzeuge nähern sich einem schmalen Durchgang...143	
Abbildung 4-34: Die Formation wird entsprechend angepasst.....	143
Abbildung 4-35: Nach dem Durchqueren der Passage breiten die Fahrzeuge sich wieder aus.....	144
Abbildung 4-36: Die Formation ist wiederhergestellt.....	144
Abbildung 4-37: Acht Fahrzeuge nähern sich einem Hindernis in ihrem Weg	145

Abbildung 4-38: Die Fahrzeuge haben sich aufgeteilt und umfahren das Hindernis beidseitig.....	145
Abbildung 4-39: Hinter dem Hindernis kommen die Fahrzeuge wieder zusammen	146
Abbildung 4-40: Die Formation wird wieder hergestellt	146
Abbildung 4-41: Drei Systeme in Reihenformation und der geplante Kurs für den <i>Virtual Leader</i>	146
Abbildung 4-42: Nach Formationsherstellung folgen die Fahrzeuge dem <i>Virtual Leader</i>	146
Abbildung 4-43: Die Systeme schmiegen sich an die Hinderniswand an. Es gibt keine Kraft, welche sie um das Objekt herum bewegen könnte.	148
Abbildung 4-44: Die anziehende Kraft zum <i>Virtual Leader</i> wird so groß, dass die Fahrzeuge ins Hindernis eindringen.....	148
Abbildung 4-45: Acht Fahrzeuge nähern sich einem konkaven viereckigen Hindernis.....	148
Abbildung 4-46: Die Formation wird zusammengedrückt, findet aber keinen Ausweg.....	148
Abbildung 4-47: Der voranschreitende <i>Virtual Leader</i> lässt die Fahrzeuge immer näher ans Hindernis rücken; es kommt zu Kollisionen untereinander	149
Abbildung 4-48: Die anziehende Kraft zum <i>Virtual Leader</i> wird so groß, dass die ersten Fahrzeuge ins Hindernis eindringen.....	149
Abbildung 4-49: Ein hierarchisch aufgebautes Rudel aus Fahrzeugen	153
Abbildung 4-50: Ein dezentraler Fahrzeugschwarm	155

Abbildung 4-51: Unterscheidung zwischen Rudel und Schwarm	156
Abbildung 4-52: Autonomiegrade der Teammitglieder in Abhängigkeit der Roboterarten	156
Abbildung 5-1: Missionsauftrag	162
Abbildung 5-2: Vorgabe virtueller Ziele zur Formationsherstellung	164
Abbildung 5-3: Nach Formationsherstellung wird die Zielfahrt aufgenommen	164
Abbildung 5-4: Nach Hindernisdetektion erfolgt die Formationsumstellung	166
Abbildung 5-5: Der rechte Roboter führt das Team, die anderen Systeme folgen	166
Abbildung 5-6: Selbständiges Hindernisausweichen der Folgefahrzeuge I.....	167
Abbildung 5-7: Selbständiges Hindernisausweichen der Folgefahrzeuge II ...	167
Abbildung 5-8: Selbständiges Hindernisausweichen der Folgefahrzeuge III ..	167
Abbildung 5-9: Nach Umfahrung des Hindernisses wird die alte Formation wiederhergestellt	167
Abbildung 5-10: Die Wiederherstellung der Formation ist abgeschlossen	168
Abbildung 5-11: In der geforderten Formation wird die Zielfahrt fortgesetzt und abgeschlossen	168
Abbildung 5-12: Situation auf der Fahrbahn zum Startzeitpunkt	173
Abbildung 5-13: Mehrere Fahrzeuge auf einer zweispurigen Fahrbahn mit Hindernis	173
Abbildung 5-14: Die Fahrzeuge organisieren das Ausweichen auf die linke Spur	173

Abbildung 5-15: Eine Lücke wurde auf der linken Fahrbahn geschaffen; das erste Fahrzeug kann ausscheren.....	175
Abbildung 5-16: Das zweite rechtsfahrende Fahrzeug verständigt sich mit einem der linksfahrenden	175
Abbildung 5-17: Während das zweite Fahrzeug nach links ausscheren kann, kehrt das erste auf die rechte Spur zurück	176
Abbildung 5-18: Beide rechtsfahrenden Fahrzeuge haben das Hindernis umfahren	176
Abbildung 5-19: Autonomiegrade der mobilen Systeme während der vorgestellten Situation, aufgetragen über der normierten Zeit.....	178
Abbildung 5-20: Ideale Situation - Unterwasserfahrzeuge in geordneter Formation.....	179
Abbildung 5-21: Unterwasserfahrzeuge in nicht intakter Formation.....	180
Abbildung 5-22: Ein Verbund aus Unterwasserfahrzeugen umfährt ein Hindernis.....	181
Abbildung 5-23: Havarie eines Einzelsystems - Die Gruppe teilt sich auf.....	182
Abbildung 6-1: Die Evolution der Robotikplattformen an der Technischen Universität Ilmenau und dem Fraunhofer AST Ilmenau; in Klammern die Jahreszahlen.....	185
Abbildung 6-2: Das mobile System ASTro	188
Abbildung 6-3: Suche nach hydrothermalen Schloten [Atl+05], [Gre07]	189
Abbildung 6-4: Kartografierung von Meereslebensräumen [Atl+05], [Gre07].....	189

Abbildung 6-5: Übersicht über die im Forschungsprojekt GREX zum Einsatz kommenden unbemannten maritimen Fahrzeuge [Atl+05], [Gre07].....	191
Abbildung 6-6: Fahrzeugteams bei Einsätzen in für den Menschen gefährlichen Gegenden [Atl+04]	194

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Mögliche Definition von diskreten Autonomiegraden.....	65
Tabelle 4-1: Regelwerk des Fuzzy-Systems zur Zielfahrt.....	94
Tabelle 4-2: Ergänzung des Regelwerkes für das Fuzzy-System zur Zielfahrt.....	95
Tabelle 4-3: Einfaches Regelwerk für das Fuzzy-System zur Hindernisvermeidung.....	98
Tabelle 4-4: Erweiterung des Regelwerkes vom Hindernisvermeidungs- Fuzzy-System zum optimalen Abdrehen bei Fronthindernissen.....	102
Tabelle 4-5: Erweiterung des Regelwerkes vom Hindernisvermeidungs- Fuzzy-Systems zur besseren Wandverfolgung	103
Tabelle 4-6: Erweiterung des Regelwerkes vom Hindernisvermeidungs- Fuzzy-Systems zur Flucht aus Räumen	104
Tabelle 5-1: Vorgänge während der Missionsausführung	169
Tabelle 5-2: Geschwindigkeitsvorgaben für die Fahrzeuge in Abhängigkeit des aktuellen Autonomiegrades	177

Abkürzungen

AGV	<u>A</u> utomated <u>G</u> uided <u>V</u> ehicle
AIS	Fraunhofer Institut für <u>A</u> utonome <u>I</u> ntelligente <u>S</u> ysteme (bis 30.06.2006)
ARS	Steinbeis-Transferzentrum <u>A</u> ngewandte <u>R</u> echner- und <u>S</u> oftware-technologien
AST	Fraunhofer <u>A</u> nwendungszentrum <u>S</u> ystem <u>t</u> echnik <u>I</u> lmenau
ASTro	Fraunhofer <u>A</u> nwendungszentrum <u>S</u> ystem <u>t</u> echnik <u>R</u> oboter oder Institut für <u>A</u> utomatisierungs- und <u>S</u> ystem <u>t</u> echnik <u>R</u> oboter
ASV	<u>A</u> utonomous <u>S</u> urface <u>V</u> ehicle
ATD	<u>A</u> dvanced <u>T</u> echnology <u>D</u> emonstration
AUV	<u>A</u> utonomous <u>U</u> nderwater <u>V</u> ehicle
BAA	<u>B</u> ioorientierte <u>A</u> daptive <u>A</u> utonomie
BWB	<u>B</u> undesamt für <u>W</u> ehrtechnik und <u>B</u> eschaffung
CARMEN	<u>C</u> arnegie <u>M</u> ellon Robot <u>N</u> avigation Toolkit
CCD	<u>C</u> harged <u>C</u> oupled <u>D</u> evice
COTS	<u>C</u> ommercial <u>O</u> ff- <u>T</u> he- <u>S</u> helf
CPG	<u>C</u> entral <u>P</u> attern <u>G</u> enerator
CT	<u>C</u> eo <u>T</u> ronics

DARPA	<u>D</u> efense <u>A</u> dvanced <u>R</u> esearch <u>P</u> rojects <u>A</u> gency
DCOM	<u>D</u> igital <u>C</u> ommunication
DFG	<u>D</u> eutsche <u>F</u> orschungsgemeinschaft
DGPS	<u>D</u> ifferential <u>G</u> lobal <u>P</u> ositioning <u>S</u> ystem
DIN	<u>D</u> eutsches <u>I</u> nstitut zur <u>N</u> ormung
EOD	<u>E</u> xplosive <u>O</u> rdnance <u>D</u> isposal
FCD	<u>F</u> uzzy <u>C</u> ontrol <u>D</u> esign
FCS	<u>F</u> uture <u>C</u> ombat <u>S</u> ystem
FIRA	<u>F</u> ederation of <u>I</u> nternational <u>R</u> obotsoccer <u>A</u> ssociation
GPL	<u>G</u> nu <u>P</u> ublic <u>L</u> icense
GPS	<u>G</u> lobal <u>P</u> ositioning <u>S</u> ystem
GSM	<u>G</u> lobal <u>S</u> ystem for <u>M</u> obile <u>C</u> ommunications
HMD	<u>H</u> ead- <u>M</u> ounted <u>D</u> isplay
HMI	<u>H</u> uman- <u>M</u> achine- <u>I</u> nterface
Hrsg.	<u>H</u> erausgeber
IDD	<u>I</u> nstrument <u>D</u> eployment <u>D</u> evice
IITB	Fraunhofer Institut für Informations- und Datenverarbeitung Karlsruhe
INT	Fraunhofer Institut für <u>N</u> aturwissenschaftlich- <u>T</u> echnische Trend- analysen
IPC	<u>I</u> nter <u>P</u> rocess <u>C</u> ommunication
IST	<u>I</u> nstituto <u>S</u> uperior <u>T</u> écnico

oder

Information Society Technologies

KI Künstliche Intelligenz

LADAR Laser Detection and Ranging

LASER Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

LED Light Emitting Diode

MATLAB Matrix Laboratory

MauSI Modell eines autonomen Systems variabler Intelligenz

MIDD Mobile Instrument Deployment Device

MMS Mensch-Maschine-Schnittstelle

Mustang Mobiles Unterstützungssystem zur Aufklärung, Nachrichtenge-
winnung und Gefahrenabwehr

NASA National Aeronautics and Space Administration

OCU Operator Control Unit

PATON Patentinformationszentrum und Online-Dienste

PC Personal Computer

PDA Personal Digital Assistant

PMD Photomischdetektor, englisch: Photonic Mixer Device

PRIMUS Program of Intelligent Mobile Unmanned Systems

RADAR Radio Detection and Ranging

oder

Radio Angle Detection and Ranging

RBM	<u>R</u> ational <u>B</u> ehaviour <u>M</u> odel
ROV	<u>R</u> emotly <u>O</u> perated <u>V</u> ehicle
SafRo	<u>S</u> afari- <u>R</u> oboter
SLAM	<u>S</u> imultaneous <u>L</u> ocalization <u>A</u> nd <u>M</u> apping
SPIE	The <u>S</u> ociety of <u>P</u> hoto-optical <u>I</u> nstrumentation <u>E</u> ngineers
UGV	<u>U</u> nmanned <u>G</u> round <u>V</u> ehicle
VRML 2.0	<u>V</u> irtual <u>R</u> eality <u>M</u> odeling <u>L</u> anguage 2.0
WLAN	<u>W</u> ireless <u>L</u> ocal <u>A</u> rea <u>N</u> etwork
ZS	<u>Z</u> entral <u>s</u> teuerung

1 Einleitung

1.1 Einführung in die Thematik mobile Roboter und unbemannte Fahrzeuge

Seit Jahrzehnten erleichtern Roboter die Arbeit des Menschen. Ganze Industriezweige, etwa die Automobilindustrie, könnte ohne diese Hilfsmittel nicht im Rahmen von bestehenden Qualitätsanforderungen und aktuellen Preisen produzieren. Die eingesetzten, oftmals als „Industrieroboter“ bezeichneten Systeme, stellen mittlerweile den Stand der Technik dar. Doch geht die in der breiten Masse der Bevölkerung vorherrschende Vorstellung von Robotern weit über diese Maschinen hinaus. Als Roboter werden im Allgemeinen humanoid gestaltete Arbeitsmaschinen angesehen, was durch die Medien und Filme generell unterstützt wird.

Seit einigen Jahren hat sich der Forschungszweig der mobilen Robotik etabliert, welcher sich mit der Steuerung unbemannter Systeme beschäftigt. Dabei steht die „Autonomie“ eines mobilen Systems häufig als Zielstellung. Die mobilen Systeme, welche Gegenstand dieser Forschung geworden sind, können dabei die unterschiedlichsten Ausmaße, Formen, Funktionen und Einsatzgebiete haben. Dabei sind viele Systeme ausschließlich zur Fortbewegung und zur Übertragung eines „Livebildes“ durch den Einsatz von Kamerasystemen ausgelegt. Andere wiederum verfügen über teilweise komplexe Manipulator-technik. Forschungsaktivitäten werden zu Lande, in der Luft, zu Wasser und im Unterwasserbereich unternommen. Folgende Anwendungsgebiete werden durch die mobile Robotik tangiert:

- **Sicherheitstechnik:** Ein wesentlicher Aspekt der Forschung mobiler Systeme ist das Einsatzgebiet Schutz und Sicherheit. Den aktuellen Stand der Technik bestimmen Systeme und Forschungsaktivitäten aus dem militärischen Bereich. Besonders die Vereinigten Staaten von Amerika betreiben sehr intensive Forschungsaktivitäten unter Bereitstellung immenser finanzieller Mittel. Aber auch in der zivilen Sicherheitstechnik, etwa bei unterschiedlichen Polizeieinheiten oder privaten Sicherheitsfirmen, gewinnt dieses Thema zunehmend an Bedeutung. Durch den Einsatz mobiler Systeme, welche – auch ohne autonome Fähigkeiten – in gefährlichen Situationen zu Aufklärungs- und Erkundungszwecken in gefährdete Bereiche vorgeschickt werden können, wird eine mögliche Gefährdung von Menschen verringert oder gänzlich ausgeschlossen.
- **Arbeitsschutz:** In vielen industriellen Applikationen ist ein Einsatz von Menschen in bestimmten Gebieten nicht wünschenswert. Das können Gebiete mit radioaktiver Strahlung, Staub, Schmutz, giftiger Atmosphäre o.ä. sein. Dabei können mobile Systeme helfen, die Gesundheit von Menschen zu schützen und eine Gefährdung abzuwenden.
- **Service-technologie:** Der Service-Bereich, vom mobilen Begleiter in Supermärkten oder Baumärkten bis hin zum persönlichen Begleiter auch in der eigenen Wohnung, ist ein klassisches Gebiet für den Einsatz mobiler Robotik. Allerdings stehen einem flächendeckenden Einsatz noch eine Vielzahl an zu überwindenden Problemen entgegen.
- **Produktion, Dienstleistungen:** Natürlich stehen bei vielen Einsätzen von Robotiktechnologie auch die Einsparung von Arbeitskraft und das damit einhergehende ökonomische Einsparpotential im Fokus der Betrachtung.

- Spielzeug-/ Hobbysektor: Unbemannte Systeme erfreuen sich als ferngesteuerte Fahrzeuge, Flugzeuge oder Schiffe seit jeher einer großen Nachfrage, sowohl als Spielzeuge für Kinder, aber auch für Erwachsene, besonders im Modellbaubereich. Neue Technologien haben bereits Einzug gehalten, etwa in Form von Roboterhunden. Aufgrund der hohen Nachfrage sowie der Option, in großen Stückzahlen und hochautomatisiert produzieren zu können, ist dieser Markt sehr interessant.
- Assistenzsysteme: Noch sehr am Anfang, aber mit wachsendem Bedarf und guten Zukunftsaussichten steht die Entwicklung der mobilen Robotiktechnologie zur Anwendung als Assistenzsystem, etwa zum Einsatz in PKW und LKW. In dieser Branche findet seit ihrem Entstehen vor über einhundert Jahren eine fortschreitende Automatisierung statt. Klassische Beispiele sind der elektrische Anlasser, die Servolenkung und der Bremskraftverstärker. Aktuell können Techniken wie Spurerhaltung und Bremsassistent aufgeführt werden. Im Rahmen der Entwicklungen im Bereich der mobilen Robotik können ebenfalls viele Anwendungen zum Einsatz kommen. Die Navigationstechnik, die in einigen Jahren wohl zum Standard gehören wird, kann bereits als ein Beispiel aufgeführt werden, denn die Lokalisation ist eine der klassischen Aufgabenstellungen der mobilen Robotik (s. Kapitel 2.2.1). Weitere Technologien aus den Bereichen Sensortechnik, Sensordatenfusion und Entscheidungssystemen werden dazukommen.
- Forschung: Die Forschung ist in allen oben genannten Anwendungen aktiv. Gegenwärtig gewinnt der Gedanke der Kooperation in Teams / Rudeln / Schwärmen zunehmend an Bedeutung. Der Einsatz mehrerer Systeme verspricht eine höhere Effektivität und das Herausbilden neuer Fähigkeiten, hebt aber zugleich die Anforderungen an die Entwicklung deutlich an.

Trotz vieler Einsatzideen und großen Anstrengungen in Forschung und Entwicklung, ist der gegenwärtige Einsatz von mobilen Robotern gerade im zivilen Bereich noch als sehr gering einzuschätzen. Viele Entwicklungen werden lediglich bis zur Simulation oder dem Aufbau eines Demonstrators geführt, ohne den Sprung zur wirtschaftlichen Nutzung zu vollziehen. Im Bereich der Simulationen und Systemdemonstratoren fällt die Vielzahl von Ansätzen auf, welche sich in allen vorhandenen Modulen und Eigenschaften auffinden lassen. Die Zielstellung der Autonomie steht oft als Schlagwort gleichsam im Raum, doch fehlt bisher eine verbindliche Definition, welche Eigenschaften und Fähigkeiten ein mobiles System besitzen muss, um als autonom gelten zu können (s. auch Kapitel 2.4). Unterschiedliche Konzepte erschweren zusätzlich den Transfer von Technologien eines Systems auf ein anderes, und behindern damit ein Zusammenarbeiten von unterschiedlichen Forschungsinstitutionen.

Die vorliegende Arbeit hat deshalb das Ziel, zum einen mögliche Realisierungen von unbemannten mobilen Systemen und besonders Gruppen aus mobilen Systemen vorzustellen und dabei im Falle der Bewegung durch ein unbekanntes Gebiet neue Ansätze zu entwerfen. Zum anderen soll mit dem vorgeschlagenen Konzept der Bioorientierten Adaptiven Autonomie ein völlig neues Verständnis der Autonomie entworfen werden. Es ermöglicht die Integration unterschiedlichster vorhandener Konzepte unter einem gemeinsamen Oberbegriff mit streng unterscheidbaren Merkmalen.

Die in dieser Arbeit beschriebenen Forschungen und Entwicklungen wurden vom Autoren im Rahmen seiner Tätigkeit im Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik an der Technischen Universität Ilmenau sowie am Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik Ilmenau (AST) des Fraunhofer Institutes für Informations- und Datenverarbeitung Karlsruhe (IITB) durchgeführt. An diesen Institutionen wurde das Thema mobile Robotik im Laufe der letzten Jahre fest in die Forschungstätigkeit aufgenommen. Die Umsetzung der

in dieser Arbeit vorgeschlagenen Konzepte auf realen Systemen wird in den nächsten Jahren schrittweise erfolgen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Nach einer kurzen Einführung erfolgt in Kapitel 2 zunächst eine Eingrenzung des Gebietes sowie ein Überblick zum aktuellen Stand der Technik. Forschungsaktivitäten werden dargestellt, welche als exemplarisch angenommen werden können. Im Anschluss daran werden ausgewählte Themengebiete vorgestellt, welche im Rahmen der mobilen Robotik als bedeutsam angesehen werden können. Dabei werden Anforderungen, aktuell vorhandene Lösungen und der weitere Bedarf an Forschungsaktivitäten und Entwicklungen besprochen. Aus einer kritischen Bewertung wird die Zielstellung dieser Arbeit abgeleitet. In Kapitel 3 wird mit der Definition der Bioorientierten Adaptiven Autonomie ein Lösungsansatz konzeptionell vorgeschlagen. Dieses Konzept soll eine Möglichkeit der Vereinigung unterschiedlicher Vorstellungen sein und gewährleisten, dass in Umsetzungen die Systemfähigkeiten optimal an reale Anforderungen adaptiert werden können. Im Kapitel 4 werden dann unterschiedliche Methoden zur Realisierung von Verbänden unbemannter Systeme entwickelt. Die erste Methode benutzt eine Hierarchiebildung in Verbänden mit kleinen Anzahlen von Systemen hochwertiger technischer Ausstattung, die andere orientiert sich an biologischen Schwärmen mit einer hohen Anzahl von System auf niedrigerem technischem Niveau. Dabei wird der Hybridansatz zur Teambildung in den Kapiteln 4.1 bis 4.3 unter Einbeziehung der adaptiven Autonomie als wesentlicher Beitrag der Arbeit angesehen. Dem wird in Kapitel 4.4 ein evolutions-/ stochastikbasierter Ansatz entgegengestellt, wobei aus Platzgründen hauptsächlich auf Arbeiten verwiesen wird, welche unter Mitar-

beit des Autors entstanden. Kapitel 4.5 stellt dem einen aus der Literatur entnommenen und realisierten Ansatz auf analytischer Basis gegenüber. Ein Vergleich der Ansätze findet in Kapitel 4.6 statt. Im selben Kapitel erfolgen auch weitere Definitionen zur Klassifizierung, und es werden gegenläufige Umsetzungen von Autonomiekonzepten unter dem Konzept der Bioorientierten Adaptiven Autonomie vereint. Gleichzeitig wird eine Wertung im Hinblick auf die Anwendung der vorgestellten Konzepte in kurz- und langfristigen Zeitrahmen abgegeben. Beispiele für Land- und Marinesysteme sowie mögliche Anwendungen im Straßenverkehr werden in Kapitel 5 aufgeführt. Kapitel 6 fasst die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick. Dabei werden weitere geplante Umsetzungen unter Anwendung der in dieser Arbeit vorgeschlagenen Strategien vorgestellt. Diese beziehen sich sowohl auf die Realisierung kleiner und mittelgroßer Systeme als Demonstratoren, als auch auf industrielle Anwendungen in den Teilgebieten Land und Meer.

2 Aktuelle Forschung und Stand der Technik

Forschungen zur Realisierung von Fahrzeugen mit den Möglichkeiten zur autonomen Operation stellen einen Schwerpunkt des Forschungsgebietes „Mobile Robotik“ dar. Dies wird beispielsweise in einem Übersichtsvortrag von Arkin [Ark01] festgestellt. An dieser Stelle soll der Fokus allgemein auf mobile Systeme gerichtet werden, welche prinzipiell in einem unbemannten Modus operieren können. Dafür werden im Allgemeinen die Bezeichnungen „mobiler Roboter“, „mobiles System“ oder auch „unbemanntes Fahrzeug“ verwendet, zwischen denen im Folgenden nicht unterschieden wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird folgende Definition zugrunde gelegt:

Definition 2.1: Mobiles System

Ein mobiles System ist ein Fahrzeug oder mobiler Roboter zu Lande, zu Wasser oder in der Luft, welches bzw. welcher sich prinzipiell im unbemannten Zustand bewegen kann, wobei zusätzlich auch eine bemannte Einsatzoption bestehen darf.

Nicht mit einbezogen werden stationäre Handhabungsgeräte, die im Allgemeinen unter der Bezeichnung „Industrieroboter“ geführt werden. Grund für die Zusammenfassung verschiedenster Systeme unterschiedlicher Größe, Ausstattung und Einsatzszenarien unter einem Oberbegriff ist die Fixierung auf Führungsstrategien und Steuerungsalgorithmen, welche in dieser Arbeit getroffen wurde. Allgemeingültige Konzepte sollen dabei auf unterschiedlichen Systemen adaptierbar sein. Der Begriff „Roboter“ wird an dieser Stelle bewusst nicht verwendet, um eine Unterscheidung von den Industrierobotern zu errei-

chen. Eine solche Unterscheidung ist nach Ansicht des Autors sinnvoll, da beides unterschiedlich gelagerte Themenkomplexe sind. Im Softwarebereich stehen bei Industrierobotern etwa die Ansteuerung von Gelenken zum Erreichen vorgegebener Positionen und Stellungen des Endeffektors oder ähnliches im Mittelpunkt, während bei mobilen Systemen das Abfahren bestimmter Wege und das Erreichen vorgegebener Punkte, oft in unbekannten Gebieten, zu den wichtigsten Aufgaben gehören. Im Allgemeinen findet eine solche Trennung nicht statt. Auf der Hannovermesse 2005 etwa waren in einem der größten Stände zum Thema Robotik, dem Stand „Anwendungszentrum Robotik“ (Halle 17, Stand B34) sowohl stationäre Industrieroboter, als auch mobile Systeme untergebracht.

Die Bezeichnung Roboter allgemein geht auf den tschechischen Schriftsteller Karel Capek zurück. Dieser bezeichnete in seinem 1921 erschienen Theaterstück „R.U.R.“ speziell als Arbeitssklaven gezüchtete Menschen mit dem tschechischen Wort *robota* (Fronarbeit) [Cap02]. So ist bis heute in der Vorstellung vieler Menschen ein Roboter ein humanoides Maschinenwesen. In der Tat könnte die zukünftige Forschung in diese Richtung gehen und somit wieder zu einer Vereinigung der getrennten Komplexe „Industrieroboter“ und „mobile Systeme“ führen. Der weite Weg bis dahin und die Tatsachen, dass viele Erkenntnisse aus dem Forschungsbereich „mobile Systeme“ auch in andere technische Bereiche wie beispielsweise die Automobilindustrie gelangt sind und gelangen werden – man denke an Navigationssysteme, Abstandsmesssysteme oder ähnliches – lassen den Autor an der Trennung festhalten.

Zusätzlich zu den Realisierungen einzelner mobiler Systeme wird ein Schwerpunkt auf die Umsetzung eines Teams oder einer Gruppe von miteinander kooperierenden Systemen gelegt. Anwendungsbeispiele dafür sind etwa in Kapitel 2.2.4 aufgezeigt. Im Interesse einer einheitlichen Sprachregelung wird im weiteren Verlauf folgende Definition angewandt:

Definition 2.2: Team / Gruppe / Verbund

Als Team / Gruppe / Verbund wird ein Zusammenschluss aus mindestens zwei mobilen Systemen zum Zwecke der Kooperation verstanden. Das bedeutet, die in einem Team / Gruppe / Verbund zusammengefassten Systeme verfolgen ein gemeinsames Ziel. Aussagen über die Führungsstrategien werden dabei nicht gemacht.

Die Bezeichnungen Team / Gruppe / Verbund werden dabei als ein Oberbegriff für verschiedene Arten von Zusammenschlüssen mobiler Systeme verstanden. Eine genauere Unterteilung hinsichtlich Aufbau und Organisation sowie eine Wertung findet in Kapitel 4.6 statt.

2.1 Forschungsaktivitäten im Bereich mobiler autonomer Systeme

Literaturrecherchen zum Thema Mobile Systeme, Fahrzeuge bzw. Roboter liefern selbst bei weiteren Einschränkungen der Suchworte große Mengen an Ergebnissen, was auf eine weite Verbreitung dieses Forschungsthemas hindeutet. Im Rahmen der Studie [SR05] wurde unter Mitarbeit des Autors eine Literatur- und Patentrecherche zu diesem Themengebiet erstellt, deren Ergebnisse an dieser Stelle auszugsweise dargestellt werden sollen. An dieser Stelle wird der Fokus hauptsächlich auf Landsysteme gerichtet, da die Aktivitäten des Autors hauptsächlich in diesem Bereich stattfanden und auch die Aufgabenstellung (s. Ende von Kapitel 2.4) diese Thematik in den Mittelpunkt stellt.

Wirft man allgemein einen Blick auf die in den Recherchedokumenten von [SR05] beschriebenen mobilen Systeme, so lässt sich eine Klassifizierung bezüglich Größe und Aufgabenspektrum treffen. Viele Systeme lassen sich der tragbaren Kleinklasse zuordnen und werden hauptsächlich für Aufklärungs- und Überwachungsaufgaben eingesetzt. Themen der Veröffentlichungen sind Ausführungen zur Mobilitätsverbesserung, Verwendung von schwenkbaren Masten sowie Aufgabenbeschreibungen im Gebäudeschutz oder in der Sprengstoffbekämpfung (EOD = Explosive Ordnance Disposal). Des Weiteren finden sich mittelgroße bis große Fahrzeugsysteme mit Ausführungen zu den Interfacetechnologien (z.B. OCUs (Operator Control Units), HMDs (Head-mounted displays), Joysticks und Systeme mit stereoskopischen Displays. Weitere Dokumente beschäftigen sich mit Mobilitätsaspekten, biologisch inspirierten Systemen sowie mit Manipulatorsystemen allgemein.

Ein weiteres Aufgabengebiet für den Einsatz mobiler Systeme ist die Erforschung der Oberflächen von Planeten und Monden im Rahmen der Raumfahrt. Wie in [Sch97] beschrieben wird, begannen die Entwicklungen entsprechender Rover-Systeme bereits in den 1960ern, wobei es in den 70ern zu ersten Einsätzen auch unbemannter Systeme auf dem Mond kam. Im Rahmen der russischen Mondmissionen wurden unbemannte Systeme vom Typ Lunochod teleoperiert insgesamt fast 50 Kilometer weit auf dem Mond bewegt. Mittlerweile wurden bereits ferngesteuerte Fahrzeuge auf dem Mars eingesetzt, etwa im Rahmen der Pathfinder Mission der NASA. Nach [Sch97] stellt der Einsatz entsprechender Systeme im Rahmen der Planetenerkundung die Wissenschaft vor eine Vielzahl von technischen Herausforderungen, wie etwa die signifikanten Signalverzögerungen, die begrenzten Kontaktperioden zur Kontrollstelle auf der Erde sowie der Einsatz in unbekannten, in vielen Bereichen deutlich von der Erde abweichenden Gegenden.

Es kann festgestellt werden, dass die militärische Forschung eine herausragende Rolle bei der Realisierung von mobilen Systemen unterschiedlicher Arten

spielt, wobei im englischen Sprachgebrauch oft die Bezeichnung „Unmanned Ground Vehicle“ (UGV) verwendet wird. Als Beispiel sei das amerikanische FCS („Future Combat System“) genannt. Nach [Glo05] ist das FCS ein über alle Teilstreitkräfte vernetztes System, welches jedem angeschlossenen Soldaten eine Vielzahl von Informationen über die Gesamtsituation liefert. Dabei spielen unbemannte Systeme zu Land und zu Luft eine herausragende Rolle und sind über ein zentrales Netzwerk mit den anderen Teilen der Streitkräfte verbunden. Nach der Zielstellung des FCS sollen in den amerikanischen Streitkräften bereits 2008 eine Reihe von unbemannten Fahrzeugen inklusive des Befehls- und Steuernetzwerkes zum Einsatz kommen, wobei im Wesentlichen auf vorhandene Technologie zurückgegriffen werden soll. In untergliederten Programmen, wie etwa dem *U. S. Army Robotic Follower ATD (Advanced Technology Demonstration)* Programm (s.a. [Jac03]), steht die Entwicklung von unbemannten Folgeeinheiten im Mittelpunkt. Diese folgen selbständig von Menschen gesteuerten Einheiten oder den Menschen direkt. Motiv für solche Einsätze kann die Personaleinsparung in Fahrzeugkonvois sein ebenso wie die Entlastung der Soldaten, deren Gepäck beispielsweise durch die ihnen folgenden unbemannten Fahrzeuge befördert wird.

Die Studie [SR05] zählt weitere Projekte unterschiedlicher Länder auf wie Kanada oder Frankreichs [Bri+04], [Vas+04]. Auch in Deutschland laufen verschiedene Projekte in dieser Richtung. Als Beispiel sei auf das Projekt PRIMUS (Program of Intelligent Mobile Unmanned Systems) verwiesen (z.B. [SPS04]).

Eine große Zahl von Dokumenten in [SR05] beschäftigt sich mit notwendigen Technologien für mobile Systeme, wobei vor allem im Bereich Sensorik für Lokalisation und für die Umfelderkennung Aktivitäten beschrieben werden. Zur Verwendung kommende Sensoren sind etwa CCD-Kameras, Kreiselinstrumente, LADAR- sowie RADAR-Sensoren, elektronischer Kompass, Infrarot-Sensoren, GPS sowie DGPS, Ultraschall-Sensoren, Beschleunigungssensoren, Impuls- bzw. Winkelgeber und taktile Sensoren. Weiterhin werden Konzepte

für verschiedene generische Fähigkeiten von mobilen Systemen vorgestellt, beispielsweise dem Folgen einer Fahrbahn oder Spur (auch im öffentlichen Verkehr), Hindernisvermeidung, Folgeverhalten (z.B. im Konvoi), Objektverfolgung, Bahnplanung, Wahrnehmung und Klassifizierung von Objekten, Maschinelles Sehen, Sensorfusion, Kommunikation, Teleoperation, Kartierung sowie die Erstellung eines Umgebungsmodells.

Einen weiteren Schwerpunkt der Dokumente in [SR05] stellen die Beschreibungen unterschiedlicher Steuerungsarchitekturen dar. Beschrieben werden verhaltensbasierte und hierarchische Ansätze. Des Weiteren erfolgen Definitionen der Autonomie im Allgemeinen. Die beschriebenen Systeme lassen sich grob in teleoperiert, semiautonom und autonom einteilen. Dabei fällt jedoch auf, dass die genaue Definition und Einteilung jeweils im Ermessen des Autoren liegt und es so mitunter zu starken Unterschieden kommt, unter welchen Voraussetzungen ein System überhaupt als „autonom“ bezeichnet werden kann. Weitere Ausführungen zu dieser Thematik finden sich im Kapitel 2.4, woraus die Zielstellung dieser Arbeit abgeleitet wird.

2.2 Übersicht über die wichtigsten Technologien im Bereich der mobilen Systeme

Es erfolgt im Weiteren eine Einschätzung der Basistechnologien im Bereich der mobilen Systeme. Es handelt sich dabei um Sensorik, Kommunikation, Mensch-Maschine-Schnittstelle und Software. Dabei besteht natürlich in vielen Punkten ein sehr enger Zusammenhang zwischen diesen Technologien. Alle haben einen unmittelbaren Einfluss auf die Gestaltung der Autonomiefähigkei-

ten eines mobilen Systems und werden daher als bedeutsam im Rahmen dieser Arbeit eingestuft.

2.2.1 Sensorik

Sensoren ermöglichen es den mobilen Systemen, Informationen aus ihrer Umgebung aufzunehmen, was eine Grundvoraussetzung für autonomes Verhalten darstellt. Im Folgenden wird auf die Bereiche Selbstlokalisierung und Umgebungserkennung eingegangen. Diese Themen sind für die Anwendungen bei mobilen Systemen sehr spezifisch. Selbstverständlich werden von mobilen Systemen weitere Sensoren benötigt und benutzt. Werden zur Energieversorgung etwa Akkus verwendet, so ist es unabdingbar, ständig den Ladestand zu überwachen, damit das System rechtzeitig zu einer Ladestation zurückkehren kann. Allerdings werden solche Sensoren auch in vielen anderen Bereichen eingesetzt, etwa in Notebooks. Ähnliches gilt beispielsweise für Sensoren zur Temperaturüberwachung. Auch viele in der mobilen Robotik als Nutzlast einsetzbare Sensortypen, wie etwa Gas- oder Strahlungsdetektoren, werden auch in anderen Bereichen eingesetzt und oftmals direkt in die mobile Robotik integriert. Demgegenüber stehen die beiden genannten Sensorik-Bereiche, welche für ein kontrolliertes autonomes Verhalten unabdingbar sind und welche in der aktuellen Forschung speziell für den Einsatz in mobilen Systemen weiterentwickelt werden. Daher werden sie im Folgenden näher betrachtet.

Selbstlokalisierung

Ein elementares Problem der Navigation mobiler Systeme ist die Fähigkeit zur Selbstlokalisierung. Die Bestimmung der eigenen Position in Relation zu einem definierten Punkt in einem zentralen Koordinatensystem ist notwendig, wenn ein ebenfalls in diesem Koordinatensystem gegebener Zielpunkt an- oder ein genau definierter Kurs abgefahren werden soll. Generell sind zwei unterschiedliche Verfahren denkbar: Eine interne Lösung mittels mitgeführter Sensorik,

welche Bewegungseigenschaften aufzeichnet (propriozeptiv), sowie ein globaler Ansatz, bei welchem externe Signale, etwa von Satelliten, empfangen und ausgewertet werden (exterozeptiv). Im internen Bereich wäre eine Erfassung der Achsendrehbewegung mittels Odometriesensor denkbar. Alternativ können Inertialsensoren wie Beschleunigungssensoren oder Drehratensensoren (Gyroskope) verwendet werden. Aus den ermittelten Größen Geschwindigkeit, Beschleunigung und/oder Drehrate lässt sich durch Integration der zurückgelegte Weg seit Beginn der Mission ermitteln. Bei definiertem Startpunkt ist damit die aktuelle Position bestimmbar. Vorteilhaft wirkt sich die ständige Verfügbarkeit der Sensorinformationen aus. Jedoch tritt bei allen Messverfahren zwangsläufig durch den Schlupf ein Messfehler auf, welcher durch die Integration zu einem ansteigenden Positionsfehler führt. Somit lässt sich dieses Verfahren nicht über beliebige Zeit mit definierter Genauigkeit anwenden. Bei den globalen Positionierungsverfahren gibt es keinen wachsenden Fehler. Dafür treten zwei andere Nachteile auf: Zum einen ist man von der Erreichbarkeit externer Sensoren abhängig. Im Falle des Satellitennavigationssystems GPS muss beispielsweise möglichst Sichtkontakt mit mindestens vier Satelliten bestehen. Dies macht die Verwendung von GPS in Gebäuden nahezu unmöglich und erschwert die Verwendung auch in verschiedenen Outdoor-Situationen, etwa in engen Häuserschluchten oder in dichten Wäldern. Das andere Problem resultiert aus der relativen Ungenauigkeit des Systems. Die oftmals in der Werbung ange deutete Genauigkeit von wenigen Metern ist oft lediglich nur auf den vom GPS-Empfangsgerät geschätzten Fehler bezogen. Beispielsweise wird in [Con06] ein entsprechendes Gerät mit Fehlern von weniger als 2,2 Metern horizontal und kleiner als 5 Metern vertikal angepriesen. Diesbezügliche Untersuchungen am Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik Ilmenau (z.B. [Tzu06]) zeigten, dass ähnliche COTS-Produkte in der Preisklasse von etwa 300 € teilweise Messfehler von über 100 Metern besitzen. In Navigationssystemen eingesetzte GPS-Technik wird in der Regel durch Interpretation der Messdaten brauchbar. Bei Lokalisationsberechnungen

von Routenplanern etwa kann davon ausgegangen werden, dass das Fahrzeug sich auf einer (dem System bekannten) Straße befindet und sich nur mit eingrenzbaren Geschwindigkeiten bewegen kann. Sprünge von über einhundert Metern in Sekundenbruchteilen können damit als Messfehler erkannt und aussortiert werden. Genauere Rohdaten lassen sich durch die Anwendung von einem DGPS (Differential Global Positioning System) gewinnen. Dabei werden ortsfeste Relaisstationen oder geostationäre Satelliten eingesetzt, deren Position bekannt oder anderweitig bestimmbar ist. Sie empfangen ebenfalls das GPS-Signal und senden über Funk ein Korrektursignal aus, welches von speziellen DGPS-Empfängern aufgenommen und zur Korrektur der GPS-Daten verwendet wird. Die erreichbare Genauigkeit ist entsprechend sehr stark von der Empfangbarkeit der Korrektursignale und damit vom Abstand bzw. der Sichtbarkeit zwischen Empfänger und Korrekturstation abhängig. Zudem entstehen bei der Nutzung des DGPS-Systems weitere Kosten.

In abgeschirmten Bereichen wie beispielsweise im Indoor-Bereich können andere Lokalisationssysteme eingesetzt werden. Im Roboterfußball werden bei den Wettbewerben der FIRA (Federation of International Robosoccer Association)-Organisation in den meisten existierenden Ligen über dem Spielfeld angebrachte Kameras verwendet, um die farblich markierten Roboter und den Ball zu lokalisieren. Dabei kann die Bildverarbeitung in Echtzeit weiterhin als große Herausforderung betrachtet werden. Das eingesetzte System ist im hohen Maße abhängig von der lokalen Beleuchtung. Dadurch muss jedes Team an einem neuen Einsatzort in einem langwierigen Verfahren die Programmparameter zur Farberkennung anpassen. Beim aktuellen Trend, wie in der Realität mit elf Spielern pro Team anzutreten, muss eine große Zahl von Farben unterschieden werden (bei FIRA bsp.: Schwarz und weiß als Spielfeldfarbe + 11 Spielerfarben + 2 Mannschaftsfarben + 1 Ballfarbe). Von manchen Teams wird daher innerhalb der eigenen Mannschaft nur eine Farbe verwendet und die Spieler bei bekannten Anfangspositionen durch Trackingverfahren unter-

2.2 Übersicht über die wichtigsten Technologien im Bereich der mobilen Systeme
 schieden. In Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2 ist ein Spielfeld aus der FIRA MiroSot-League mit den beschriebenen Kameras dargestellt.



Abbildung 2-1: Die FIRA-MiroSot League

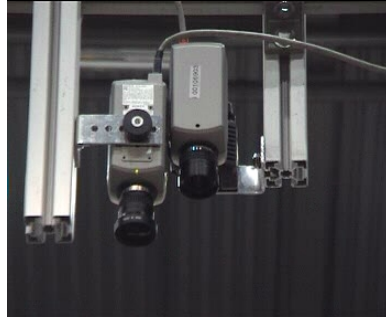


Abbildung 2-2: Über dem Spielfeld aufgehängte Kameras dienen der Positionsbestimmung der Roboter

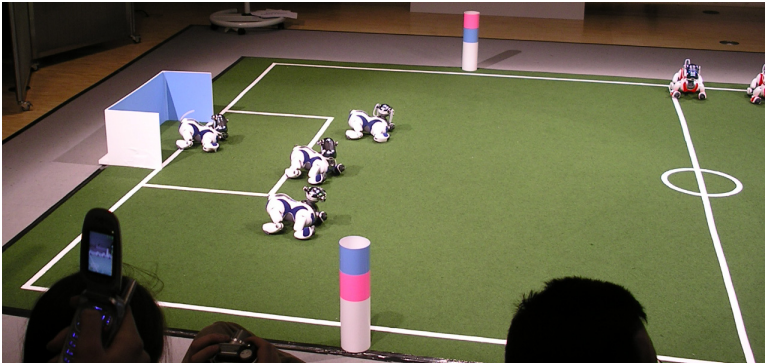


Abbildung 2-3: Farbige Tore und Pfosten dienen der Orientierung in der Robocup Four Legged League

In den meisten Veranstaltungen der Robocup-Organisation gibt es keine zentral über dem Spielfeld angebrachten Kameras. Dafür ist jedes Teammitglied

individuell mit einer oder mehreren Kameras ausgestattet und orientiert sich an den Farben der Tore bzw. der farbig markierten Pfosten an den Rändern des Spielfeldes (s. beispielsweise Abbildung 2-3). Hierbei ist die Herausforderung für die Orientierungssoftware höher als bei der Lösung mit den zentral über den Spielfeldern angebrachten Kameras. Deshalb ist bei Betrachtung eines Spiels deutlich die größere Schwierigkeit durch oft auftretende Orientierungslosigkeit einzelner Teammitglieder zu beobachten.

Bei beiden beschriebenen Orientierungsmethoden des Roboterfußballs ist ein klarer Nachteil festzuhalten: die besonders gravierende Abhängigkeit von der Beleuchtung. Bei aktuellen Wettbewerben müssen die Teilnehmer ihre Software individuell auf jedes neue Spielfeld anpassen, was sehr zeitintensiv ist. Wird während des Spiels die Beleuchtung nur geringfügig geändert, beispielsweise durch das Ausschalten von Lampen am Nachbarspielfeld, kann meist nicht ohne Neujustierung weitergespielt werden. Außerdem ergibt sich eine Vielzahl weiterer Beschränkungen. Die Schiedsrichter in der Robocup Four Legged League etwa dürfen keine blauen Jeans-Hosen tragen, da dies die Robotersysteme verwirren könnte. Bei den Robocup German Open 2005 in Paderborn musste zum Beispiel ein Zuschauer gebeten werden, seinen Platz in der ersten Reihe freizumachen, da sein Hemd dieselbe Farbe wie der Spielball hatte und die Systeme dadurch verwirrte.

Als weiteres Beispiel für globale, indoorgeeignete Lokalisationssysteme sei auf das Cricket-System [Mit06] verwiesen. Bei dieser Methode werden sowohl das mobile System als auch der Raum, in welchem die Mission ablaufen soll, mit speziellen Cricket-Modulen ausgestattet. Diese kommunizieren sowohl über Funk als auch über Ultraschall und berechnen aus den Laufzeitunterschieden der Signale die genauen Positionen. Mindestens drei Module müssen dabei im Raum angebracht werden und sich in der Reichweite von 9 Metern des Moduls auf dem mobilen System befinden. Dies führt entsprechend zu hohem Aufwand, besonders in größeren Räumen. Außerdem ist ein Einsatz in unbekann-

ten Gebäuden unmöglich. Für das System spricht seine hohe Genauigkeit im Bereich weniger Zentimeter [Gus06].

Eine bessere Lösung zur Selbstlokalisierung lässt sich in der Regel durch Kombination aus interner und globaler Sensorik erreichen, wie es sich beispielsweise bei festeingebauten GPS-Systemen im Automobilbereich zeigt. Bei diesem Verfahren werden GPS-Signale wie auch Odometrieimpulse verwendet. Die Odometrieimpulse erlauben die eindeutige Detektion eines Stillstandes oder einer langsamen Bewegung, so dass größere Sprünge der GPS-Daten leicht als Messfehler erkannt werden. Der durch die Integration wachsende Fehler der internen Sensorik kann durch regelmäßiges Anpassen mit Hilfe der korrigierten GPS-Daten zurückgesetzt werden. Häufig wird ein Zustandsmodell verwendet, bei welchem die verrauschte Messgröße Beschleunigung oder Geschwindigkeit als Eingangs- und die aktuelle Position als Ausgangsgröße verwendet wird. Mit den periodisch zur Verfügung stehenden globalen Messwerten wird eine Korrektur über ein Kalman-Filter-Konzept durchgeführt.

Bei den bisher vorgestellten Lokalisationsverfahren war das möglichst exakte Bestimmen der eigenen Position in einem vorgegebenen Koordinatensystem das Ziel der Bemühungen. Generell sind jedoch auch andere Vorgehensweisen denkbar. So ist beispielsweise der Mensch in der Lage, vorgegebene Ziele wie etwa nummerierte Zimmer in einem Gebäude zu finden, ohne seine exakte Position zu kennen, etwa in Relation zur Eingangstür. Es ist denkbar, dass mobile Systeme zukünftig ebenfalls solche Verfahren anwenden. In einem bekannten Gebäude könnte beispielsweise eine vorliegende Grundrisskarte verwendet werden, in welcher das mobile System seine aktuelle Position mit Hilfe seiner Abstandssensoren hinreichend genau feststellt. So lässt sich über Wände, Ecken, Fenster oder ähnliche detektierbare Baueigenschaften die ungefähre Position ermitteln, und das mobile System kann sich somit vortasten. Auch in Outdoor-Missionen sind ähnliche Vorgehensweisen denkbar, etwa anhand markanter Landmarken. Deutlich schwieriger gestaltet sich dieses

Verfahren bei Einsätzen in unbekannten Gegenden oder Gebäuden. Denkbar wäre, dass das mobile System selbst eine Karte produziert und diese direkt zur Positionsbestimmung verwendet. Dieses Verfahren wird als SLAM bezeichnet. Weitere Informationen können der Website zum OpenSLAM-Projekt entnommen werden [SFG08]. Gerade in Outdoor-Missionen mit oftmals sehr unstrukturierten Umgebungen stellt dieses Verfahren eine große Herausforderung dar. Bei dieser Aufgabe zeigt sich deutlich der kognitive Vorsprung des Menschen vor technischen Systemen. Der Mensch wendet dieses Verfahren mehr oder weniger erfolgreich intuitiv an.

Umgebungserkennung

Das Streben nach mehr Autonomie in der mobilen Robotik verlangt eine immer umfassendere, vollständige und vor allem schnellere Erkennung aller möglichen Hindernisse in der Umgebung. Wie bereits erwähnt, bieten sich eine Vielzahl von möglichen Sensortypen an, wie beispielsweise Infrarot-, Ultraschall-, Radarsensoren und Kameras. Die Nutzung mehrerer Sensortypen gleichzeitig ermöglicht dabei eine bessere Abdeckung der Umgebung. Trotzdem muss in jedem Fall eine durchdachte Auswertung der Sensormesswerte in Form einer Sensorfusion erfolgen. Standardsensoren, wie etwa die beim Robotersystem ASTro eingesetzten Ultraschallsensoren (s. Kapitel 6.1.1), liefern keine absoluten Informationen über die Verteilung der Hindernisse im Raum, sondern lediglich einen Messwert, aus welchem sich die Entfernung zum nächsten Objekt innerhalb der Messkeule ermitteln lässt. Damit kann jedoch weder sicher ausgesagt werden, in welchem Winkel innerhalb der Messkeule sich das Objekt befindet, noch ist feststellbar, um was für ein Objekt es sich handelt. Eine sichere Detektion ist im Wesentlichen bei großen, feststehenden Objekten wie beispielsweise einer Wand mit einer bestimmten Höhe gegeben.

Aktuelle Technologien beinhalten oft bildgestützte Kamerasysteme, was entsprechende Anforderungen an die Hardware stellt. Beispielsweise kommen Photomischdetektoren (PMD-Sensor, englisch: Photonic Mixer Device)

[Möl+05] zum Einsatz. Dabei trifft ein modulierte Lichtsignal nach Reflexion in der zu vermessenden Szene auf einen optischen PMD-Sensor, welcher ebenfalls an die Modulationsquelle des ursprünglichen Lichtsignals gekoppelt ist. Auf diese Weise können Entfernungen zu Objekten in der Umgebung direkt wahrgenommen werden.

Existierende Fahrzeuge haben oftmals Probleme mit sehr flachen, stufenartigen Hindernissen. In Abbildung 2-4 ist der Roboter Kurt3D vom Fraunhofer AIS (Fraunhofer-Institut für Autonome Intelligente Systeme) bei seinem Auftritt bei den Robocup German Open 2005 in Paderborn dargestellt. Während dieses mobile System Hindernisse, welche genauso groß wie es selbst sind, erkennen und umfahren konnte (beispielsweise den großen Karton rechts), kollidierte er mit einer flachen Holzpalette (hinten im Bild).



Abbildung 2-4: Der Roboter Kurt3D vom Fraunhofer AIS auf den Robocup German Open 2005

Weitere klassische Probleme sind das Erkennen von sogenannten negativen Hindernissen wie Gräben oder Löchern sowie das Unterscheiden von flachen Schlaglöchern, welche ungefährdet durchfahren werden können. Besonders problematisch wird diese Aufgabe bei höheren Geschwindigkeiten. Dies zeigte sich etwa beim DARPA Grand Challenge 2004. Bei dieser Veranstaltung

waren Forschungsteams aufgefordert worden, eine Strecke von ca. 220 km durch die Mojave-Wüste in Kalifornien und Nevada innerhalb von maximal 10 Stunden mit einem autonomen Fahrzeug zurückzulegen. Dem Abschlussbericht dieser Veranstaltung [Dar05] können interessante Details entnommen werden. So wird beispielsweise festgestellt, dass nur wenige Teams bislang an der Aufgabe arbeiten, ein Fahrzeug autonom durch schwieriges Gelände zu manövrieren. Dabei würden bislang nur geringe Geschwindigkeiten angestrebt, was im Widerspruch zur Forderung des Militärs nach Geschwindigkeiten im Bereich von 24 – 32 km/h stehen würde. Durch diesen Wettbewerb wollte die DARPA eine gezielte Routemap für die weitere Entwicklung vorgeben, wie es in Abbildung 2-5 dargestellt ist. Zunächst sollte die für militärische Anwendungen nötige höhere Geschwindigkeit erreicht werden. Dann soll die Entwicklung hin zu komplexeren Aufgaben erfolgen.

DARPA Grand Challenge Strategy

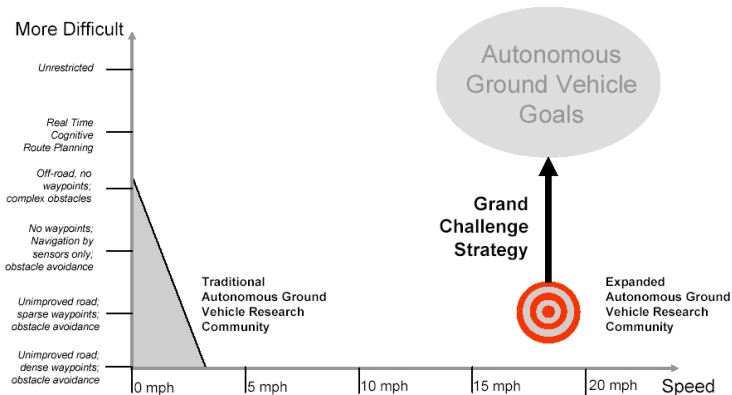


Abbildung 2-5: Von der DARPA angestrebte Entwicklungs-Routemap [Dar05]

Interessant ist das Ergebnis des Grand Challenge 2004. Von 86 Bewerber-Teams wurden letztendlich 15 zur Teilnahme zugelassen. Davon erreichte kein

einziges das Ziel. Das am weitesten kommende Fahrzeug schied nach 7,4 Meilen aus. Die Gründe des Ausscheidens sind in [Dar05] beschrieben. Man stellt fest, dass eine große Anzahl an Teilnehmern durch Kollision mit unterschiedlichsten Hindernissen ausschied. Die Erfassung von Hindernissen bei den geforderten Geschwindigkeiten ist definitiv ein großes Problem in diesem Forschungsbereich.

Der Grand Challenge fand auch 2005 wieder statt [Dar07b]. Diesmal erreichten mehrere Fahrzeuge das Ziel. Der Sieg ging an das Team von der Stanford-Universität und der Volkswagen-Forschung Electronics Research Laboratory. Dieses Team schickte einen mit umfangreicher Sensorik wie Radargerät, Kamera und Laserdetektoren ausgestatteten Volkswagen Touareg auf die 282 Kilometer lange Strecke. Auch dieses Fahrzeug hatte dabei, obwohl bei dieser außerordentlich anspruchsvollen Aufgabe siegreich, noch vielfältige Schwierigkeiten bei der zuverlässigen Detektion von Hindernissen. Beispielsweise bereiteten Pfützen eine große Schwierigkeit. Eine Auswertung des Kamerabildes liefert den Hinweis auf etwas Dunkles, schwer Einzuordnendes. Laserstrahlen werden an der Wasseroberfläche nicht nach hinten reflektiert; es wird also ein unendlich tiefes Loch detektiert. Aber auch andere, kleine Objekte werden oft nicht als das erkannt, was sie sind. Der vorgestellte Touareg etwa nimmt einen Schmetterling als ein ernstes Hindernis wahr, bremst vor ihm ab und fährt um ihn herum. 2007 fand die Veranstaltung als DARPA URBAN CHALLENGE auf einem ehemaligen Luftwaffenstützpunkt in urbaner Umgebung statt. Die Fahrzeuge mussten sich autonom gemäß aktueller Verkehrsregeln zusammen mit von Menschen gesteuerten Fahrzeugen durch einen definierten Parcours bewegen [Dar07a].

Auch andere Technologien, welche zur automatischen Umgebungserkennung eingesetzt werden sollen, sind oftmals noch nicht ausgereift. So zeigt Abbildung 2-6 etwa die Aufnahme einer Wärmebildkamera, welche in der Nähe des Fraunhofer AST Ilmenau entstand. Solche Aufnahmen sollen etwa

von mobilen Systemen zur Identifikation von Menschen eingesetzt werden, welche sich aufgrund ihrer Körpertemperatur von der Umgebung unterscheiden. Während solche Verfahren bei kühler Witterung bereits angewendet werden können, versagen sie völlig bei großer Wärme. Dies wird in Abbildung 2-6 deutlich, welche an einem heißen Sommertag aufgenommen wurde. Nur schemenhaft ist auf dem Bild die Person auf der Ladefläche des Lastkraftwagens zu erkennen. Ein auf maximale Wärme ausgelegter Algorithmus wird sie nicht finden, da die heißesten Punkte im Bild auf dem Asphalt und den Reifen des Lastkraftwagens zu finden sind. Auch sonst weist der Mensch in diesem Beispiel keine markanten Unterscheidungsmerkmale zu anderen Teilen im Bild auf, etwa zum grasbedeckten Hang im Vordergrund.

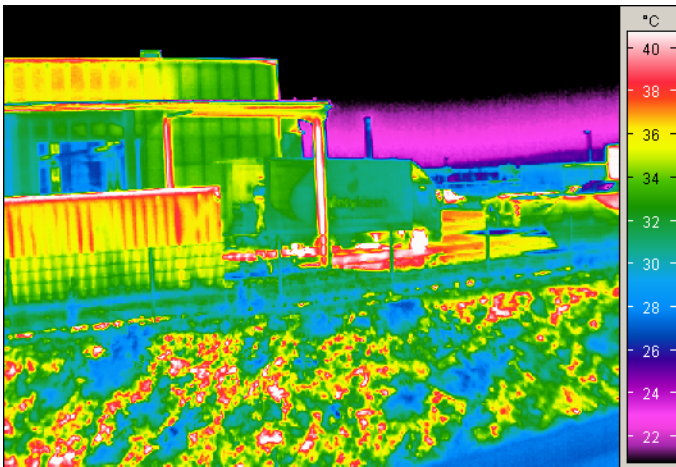


Abbildung 2-6: Aufnahme einer Wärmebildkamera (Bild zu Verfügung gestellt vom Fraunhofer AST Ilmenau)

Zusammenfassung Sensorik

Als Resultat der Betrachtungen bleibt die Sensorik als eines der großen Forschungsfelder in der mobilen Robotik. Es ist zwar bereits eine Vielzahl von

unterschiedlichsten Sensoren für die verschiedenen Aufgaben vorhanden. Trotzdem ergeben sich noch viele Probleme im Bereich der Nutzung der gewonnenen Messdaten. Für die weitere Entwicklung können teilweise neue Sensoren die Qualität der Messdaten verbessern. Gleichzeitig muss auf allen Bereichen eine intelligente Auswertung der Messwerte und Interpretation der Resultate erfolgen. Entscheidend ist zum einen die Auswahl und Anordnung von Sensoren, zum anderen dann die Fusion der einzelnen Messwerte. Das Thema Sensorfusion bleibt als eine große Herausforderung, welche bereits in den ebenfalls noch zu betrachtenden Bereich der Software hineinragt.

2.2.2 Kommunikation

Gerade für die Realisierung von Verbänden aus autonomen mobilen Systemen ist eine Kommunikation untereinander unerlässlich. Ansonsten kann nur sehr schwer von kooperierendem Verhalten gesprochen werden. Dieser Gesichtspunkt unterscheidet sich wesentlich von der Realisierung einzela autonomer Systeme, da bei diesen auch Umsetzungen ohne jegliche Kommunikation denkbar sind. Besonders im Unterwasserbereich werden autonome Systeme ohne Kommunikationsfähigkeiten eingesetzt, weil die Datenübertragung unter Wasser noch sehr problematisch ist und erst am Beginn einer industrietauglichen Umsetzung steht. Es soll im Folgenden nur die kabelfreie Kommunikation berücksichtigt werden, da andere Verfahren zwar noch in Testsystemen Verwendung finden können, jedoch für industrielle Umsetzungen zu Lande ungeeignet sind.

Prinzipiell ist zwischen Verbindungen der Einzelsysteme untereinander und Verbindungen von Einzelsystemen zu einer Zentralstation zu unterscheiden. Während Verbindungen zwischen Einzelsystemen in der Regel deutlich kürzere Entfernungen überbrücken müssen, kann die Datenübertragung aufgrund von niedrigen Bauformen der Systeme und Hindernissen in der Sichtlinie

behindert werden. Eine Basisstation hingegen ist zumeist weiter entfernt, kann aber auch baulich günstiger realisiert werden, z.B. mit einem Funkmast oder auf einem Berg. Generell erschweren größere Entfernungen sowie Hindernisse in der Sichtlinie eine zuverlässige Datenübertragung.

Grundsätzlich stehen analoge und digitale Funkstrecken zur Verfügung. Der wesentliche Vorteil von geeigneten analogen Funkstrecken ist im Preis zu sehen (ab etwa 100 €). Dabei sind jedoch deutliche Einschränkungen zu machen, was die Reichweite und die Zuverlässigkeit angeht. Besonders in Gebäuden kann die Reichweite auf wenige Meter zusammenbrechen. Bei Übertragung von Videodaten, beispielsweise zum Teleoperieren eines mobilen Systems, kann es zu starken Störungen durch Mehrwegeausbreitung, frequenzselektiver Auslöschung und Doppler-Effekt kommen, besonders bei schneller Bewegung des mobilen Systems.

Im digitalen Bereich steht die WLAN-Technologie als COTS-Komponente kostengünstig zur Verfügung. Ein Vorteil dieser Technologie ist die einfache Anbindung an übliche PC-Systeme. Nachteilig ist das Fehlen von garantierten Laufzeiten, was sich besonders bei Videoübertragung nachteilig auswirkt. Generell ist beim Einsatz von WLAN mit Problemen zu rechnen, wenn eine Datenübertragung in Echtzeit gefordert ist. Dennoch führen die große Verfügbarkeit und der günstige Preis dieser Technologie zu einem weitläufigen Einsatz im Gebiet der mobilen Robotik.

Abbildung 2-7 und Abbildung 2-8 zeigt eine digitale Funkstrecke CT-DCOM der Firma CT-Video GmbH, welche am Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik Ilmenau im Einsatz ist. Dort wurden gute Erfahrungen mit dieser Technologie im Bereich Robotiksysteme gemacht. Es wurden Tests durchgeführt, bei denen Videodaten mit hoher Auflösung in Echtzeit über mehrere hundert Meter zuverlässig übertragen wurden. Die Tests fanden in einem Gewerbegebiet statt, so dass kein Sichtkontakt zwischen Sender und Empfänger bestand. Die Sendeleistung betrug dabei 1 Watt, was deutlich weni-

ger ist als bei einer ähnlichen Realisierung mit analoger Technologie. Als Nachteil steht generell der hohe Preis (mehrere tausend Euro). Außerdem führt jede Digitalverarbeitung zum Auftreten einer Totzeit; es muss im Einzelfall entschieden werden, ob dies hinnehmbar ist. Weiterhin ist zu beachten, dass eine Digitalfunkstrecke bei Überschreitung der Maximalreichweite plötzlich zusammenbricht. Bei analogen Funkstrecken kündigt sich das Erreichen der maximalen Entfernung durch schrittweise Verschlechterung der Übertragung an, was besonders bei Videodaten deutlich ersichtlich ist.



Abbildung 2-7: Digitaler Transceiver auf einem mobilen System



Abbildung 2-8: Digitaler Transceiver als Basisstation
(Bilder zu Verfügung gestellt vom Fraunhofer AST
Ilmenau)

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Kommunikation besteht im Abwurf kleiner Funkmodule durch mobile Systeme, welche als Relaisstationen in der Kommunikation dienen können. Nachteilig wirkt sich jedoch wiederum der Preis aus; es sei denn, die mobilen Stationen können hinterher wieder eingesammelt werden. Außerdem erhöht jede Relaisstation die Laufzeit des Signals.

Im Unterwasserbereich wurde die Problematik der Datenübertragung bereits angedeutet. Es können unter Wasser keine Funkstrecken eingesetzt werden. Seit einiger Zeit stehen akustische Datenmodems zur Verfügung, welche eine äußerst schmalbandige und unzuverlässige Kommunikation ermöglichen. Beispielsweise wird ein solches System in [Ban+06] vorgestellt. Versuche mit ähnlichen Systemen im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes GREX (s. Kapitel 6.1.2 sowie [Gre07]) zeigten noch große Schwierigkeiten. Eine einigermaßen zuverlässige Datenübertragung ist abhängig von einer Vielzahl von Faktoren, wie Wassertiefe, Bodenbeschaffenheit, Umgebung (offenes Meer oder Hafenanlagen), Position von Sender und Empfänger zueinander usw. Bisher liegen nur sehr wenige Erkenntnisse darüber vor, unter welchen Umständen eine optimale Kommunikation zu erzielen ist. Auch fehlen ausführliche Tests, welche über eine reine Punkt-zu-Punkt-Kommunikation hinausgehen und echte Netzwerke umsetzen.



Abbildung 2-9: Akustik-Modem der Firma EvoLogics zur Kommunikation unter Wasser
[Ban+06]

Bessere Resultate liegen beim Einsatz von unbemannten Oberflächenfahrzeugen vor. In diesem Fall kann wiederum auf Funkstrecken zurückgegriffen werden. Aufgrund der ebenen Oberfläche des Meeres bestehen im Vergleich zum Land deutlich bessere Einsatzbedingungen. Dies eröffnet neue Möglichkeiten beim Einsatz von unbemannten maritimen Fahrzeugteams. Ein oder mehrere Unterwasserfahrzeuge können mit einem Oberflächenfahrzeug kooperieren, welches als Relaisstation dient. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei akustischer Unterwasserkommunikation eine vertikale Ausbreitung zu

besseren Resultaten führt, da es im Gegensatz zur horizontalen Ausbreitung nicht zu Störungen durch Reflexionen am Meeresboden und der Wasseroberfläche kommt.

Prinzipiell bleibt also festzuhalten, dass die Möglichkeiten zur Kommunikation bei der Entwicklung von autonomen mobilen Systemen von Anfang an zu berücksichtigen sind und unbedingt in den Entwurf der Kontrollstruktur einfließen müssen. In unterschiedlichen Szenarien muss möglicherweise ohne flächendeckende Kommunikation gearbeitet werden. Dabei können andere Technologien notwendig sein, wie etwa die Anwendung von Pheromonen bei Ameisensimulationen. Auf diese Thematik wird in Kapitel 4.4 näher eingegangen. Dort wird ein Beispiel für eine Realisierung gezeigt, bei der nur Datenübertragung von der Basisstation zu den Einzelsystemen möglich ist. Es wird deutlich werden, dass solche Einschränkungen schwerwiegende Auswirkungen auf die Umsetzung des autonomen Verhaltens im Rahmen des vorgeschlagenen Konzeptes haben.

2.2.3 Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS)

Bei vielen aktuellen Anwendungen für mobile Systeme, etwa im Bereich der Sprengmittelbeseitigung, spielen teleoperierte Systeme eine große Rolle. Dem Menschen kommt noch eine große Bedeutung in der direkten Steuerung und Einschätzung der Gesamtsituation zu. Er muss den Roboter teleoperieren. Dies wird in der allgemeinen Diskussion häufig mit „Fernsteuern“ gleichgesetzt, was ja bereits gelöst und selbst im low-cost-Spielzeugsektor erhältlich sei. Bei dieser Einschätzung wird jedoch ein sehr wesentlicher Faktor übersehen: Bei ferngesteuerten Spielzeugsystemen läuft der Bediener in der Regel hinter dem Fahrzeug her. Er ist in unmittelbarer Nähe des Systems (auch weil die Reichweite der Funkfernsteuerung oft stark begrenzt ist) und hat in jedem Fall

ständigen Sichtkontakt. Dieser Umstand kann in realen Anwendungen nicht vorausgesetzt werden.

Bei der Entschärfung von Sprengmaterial oder dem Erkunden etwa eines verdächtigen Gebäudes ist in den meisten Fällen kein Sichtkontakt zwischen Bediener und System mehr möglich; dies ergibt sich geradezu aus der Forderung, den Bediener bestmöglich zu schützen. Deswegen ist eine geeignete Mensch-Maschine-Schnittstelle (englisch Human Machine Interface, HMI) erforderlich. Der Bediener muss den Zustand des mobilen Systems und der unmittelbaren Umgebung einschätzen können, ohne sie direkt überblicken zu können. Gegenwärtig erfolgt dies meist über auf dem System installierte Kamerasysteme. Dadurch fehlt dem Bediener ein umfassender Umblick. Die Steuerung über ein einfaches Kamerasystem ist für den Menschen ungewohnt; er ist Stereosehen gewohnt und außerdem in der Ausrichtung seiner „Sensoren“, sprich Augen, hochmobil. Beim Rückwärtsfahren mit einem PKW etwa ist der Mensch ständig in Bewegung, um die Situation hinter dem Fahrzeug, aber auch an den Seiten und vorne gleichzeitig überblicken zu können. Eine solche Hochmobilität ist bei mobilen Systemen, selbst wenn sie mit Stereokamerasystemen ausgestattet sind, gegenwärtig noch nicht gegeben. Teilweise wird versucht, mittels eines über dem Fahrzeug angebrachten Spiegels eine Art Rundumsicht, konzentriert auf einer zweidimensionalen Abbildung, zu schaffen. Doch auch dabei wird der Bediener stark gefordert, da der Mensch eine solche Darstellung nicht gewohnt ist.

Abbildung 2-10 zeigt ein Hindernis, wie es beim RoboCup Rescue-Wettbewerb bei den German Open 2005 in Paderborn von den teleoperierten mobilen Robotern überwunden werden sollte. Der Bediener saß dabei hinter einer Wand und hatte keine direkte Sicht auf die Situation. Das Hindernis besteht aus unterschiedlich langen Holzquadern, welche in einem Rahmen aufgerichtet sind. An diesem Hindernis scheiterten selbst Roboter, welche von ihrer Lokomotionsplattform her zur Überwindung befähigt gewesen wären. Teilweise wurden Kamerasysteme nach oben ausgefahren, was dann aber

wiederum sehr viel Zeit in Anspruch nahm. Wie schon bei der Sensorik aufgeführt, ist Zeit ein wichtiges Kriterium im Einsatz. Transferzeiten von über einer Minute, wie sie für das oben abgebildete Hindernis bei dem Wettbewerb benötigt wurden, sind für reale Anwendungen völlig unakzeptabel. Man beachte auch: Ein Mensch könnte durch vorsichtiges Vortasten das Hindernis selbst mit geschlossenen Augen in kürzester Zeit überwinden.



Abbildung 2-10: Eingangshindernis beim RoboCup Rescue-Wettbewerb bei den German Open 2005 in Paderborn

Besonders in militärischen Applikationen spielt neben der Geschwindigkeit auch noch der Schutz des Bedieners eine besondere Rolle. Wenn mobile Systeme in direktem Feindkontakt eingesetzt werden, befindet sich der bedienende Soldat oft nur wenige hundert Meter entfernt. Er kann nicht seine gesamte Aufmerksamkeit auf das mobile System lenken, sondern muss auch seine eigene unmittelbare Umgebung überwachen. Deshalb ist es von herausragender

Bedeutung, dass die Interaktion mit dem mobilen System auf ein Minimum reduziert wird. Die Einsatzszenarien lassen sich nach [KF03] in die typischen 3D-Charakteristiken einteilen: Dirty (Chemische, nukleare, biologische oder Minenaufklärung), Dangerous (Erkunden von feindlich besetztem Gelände/Gebäude), Dull („Langweilige“ Überwachung eines Geländeabschnittes).

Drei wesentliche Forderungen lassen sich daraus ableiten:

- Die von den mobilen Systemen gesammelten Informationen müssen vom mobilen System selbst oder vom Zentralrechner vorverarbeitet werden. Dem Bediener müssen die wesentlichen Informationen, geordnet nach ihrer Wichtung und Priorität, übersichtlich angezeigt werden. Je mehr Systeme von einem einzelnen Menschen kontrolliert werden, umso bedeutender wird dieser Aspekt. Es ist beispielsweise nicht sinnvoll, den Bediener vor zehn Monitore zu setzen, auf welchen die Kameraaufzeichnungen von zehn in starrer Formation fahrender Fahrzeuge angezeigt werden.
- Der Bediener muss seine Anweisungen an das mobile System schnell weitergeben können. Die Bedieneinheiten sollten möglichst klein und leicht sein. Möglicherweise ist es sinnvoll, wenn der Roboter auch durch Worte oder Gesten Anweisungen erhalten kann oder wenn der Roboter Bewegungen des Menschen imitiert).
- Zur weiteren Entlastung des Bedieners ist es unumgänglich, dass das mobile System einfachere Aufgaben selbständig ausführt. Beispielsweise könnte eine Anweisung die Fahrt auf einen nahe gelegenen Hügel sein, welche das System dann autonom ausführt, d.h. ohne dass der Bediener ständig Geschwindigkeit und Lenkwinkel vorgeben muss.

In der Studie [Kla+04] werden Betrachtungen zur Mensch-Roboter-Interaktion gemacht. Im Nahfeld wird auf die Möglichkeit zur Kommunikation mittels Sprache und Gesten hingewiesen, wohingegen über räumliche und

zeitliche Distanz Systeme wie PCs oder PDAs zum Standard gehörten. Der Trend gehe zur Einbeziehung von Augmented Reality mit dem Ziel, dem Bediener ein hohes Maß an Realismus bei der Wahrnehmung zu ermöglichen (vergleichbar mit den Virtuellen Realitäten aktueller Computerspiele). Ein weiterer Aspekt sei die Umgebungsmodellierung (Übergang von reiner Aufzeichnung von Sensordaten durch die technischen Systeme zur deren Interpretation; s. auch bei Sensoren und Software, besonders zur Entlastung des Bedieners).

Das Zusammenspiel von Menschen und Maschinen unter dem Aspekt von Autonomie kann auch ethische und juristische Fragen aufwerfen. Das gilt besonders dann, wenn von den Maschinen, d.h. mobilen Systemen, Gefahren ausgehen können, beispielsweise durch Bewaffnung im militärischen oder polizeidienstlichen Einsatz, durch Manipulatoren mit Gefahrenpotential oder auch aufgrund von Größe und Gewicht des sich bewegenden Systems. Auch bei Schaffung entsprechender gesetzlicher Grundlagen bleibt aus wirtschaftlicher Sicht die Frage der Produkthaftung bestehen. Entsprechende Betrachtungen führte der Autor bereits in [WG03] durch (s. Abbildung 2-11). Der Mensch steht dabei im Schnittpunkt zwischen den technischen Systemen auf der einen und der Ethik sowie den Gesetzen der Gesellschaft auf der anderen Seite. Er ist mit seinen kognitiven Fähigkeiten jedem technischen System überlegen, und nur er kann Verantwortung im juristischen Sinne übernehmen. Deswegen ist es notwendig, dass gewisse Aktionen mit möglichen schwerwiegenden Konsequenzen ganz bewusst von ihm und damit in seiner Verantwortung ausgeführt werden. Nur er ist für die Gesamtstrategie verantwortlich. Wie in Abbildung 2-11 zu sehen ist, kann natürlich auch das technische System selbst den Aktionskreis schließen. Dann muss jedoch unter Umständen der Einsatz bestimmter Akteure wie Waffen ausgeschlossen sein. Umgekehrt ist jedoch auch der Fall denkbar, dass das System den Menschen überwacht und bei Zweifel an der Kompetenz keine weiteren Befehle mit dem Einsatz be-

denklicher Module ausführt bzw. einen definierten Ruhezustand einnimmt. Solche Zweifel können im militärischen Sektor aus dem Verdacht der Übernahme des Systems von einem Gegner entstehen. Im zivilen Bereich ist beispielsweise eine vorübergehende Inkompetenz des Bedieners durch Müdigkeit oder Drogeneinnahme denkbar, die das System erkennen und darauf reagieren könnte.

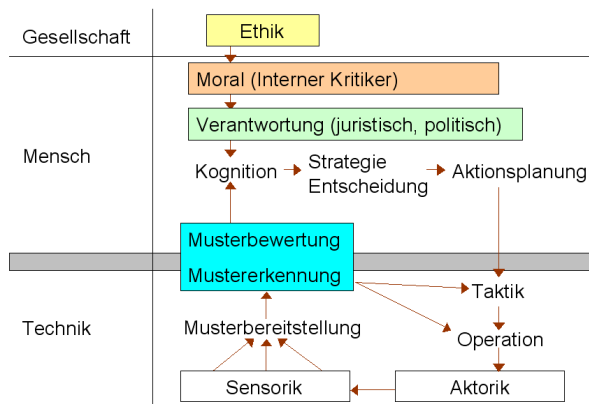


Abbildung 2-11: Die Steuerung von mobilen Systemen durch den Menschen: Der Mensch in der ethischen und juristischen Verantwortung

2.2.4 Software

Die Software, d.h. die Algorithmen, stellt eine der größten Herausforderungen dar und spielt auch in die beiden anderen ausgeführten Bereiche mit hinein. Sowohl die Fusion unterschiedlicher Sensordaten als auch die Umsetzung der Mensch-Maschine-Interaktion auf der Seite der mobilen Systeme erfolgt durch die Software. Die Studie [Kla+04] nennt als größte Herausforderungen in dem Gebiet der mobilen Systeme Mechatronik und Systemintegration, Sensordateninterpretation und Szenenanalyse, Handlungs- und Missionsplanung sowie

Koordination und Kooperation (Mensch-Roboter u. Roboter-Roboter). An den genannten Herausforderungen sieht man auch die enorme Bedeutung dieser Technologie: An drei von vier Herausforderungen ist die Software beteiligt.

Ein verbreiteter Standard in der Steuerung mobiler Systeme ist das Toolkit CARMEN [CAR09] der Carnegie Mellon Universität, Pittsburgh, USA. CARMEN (Carnegie Mellon Robot Navigation Toolkit) ist eine Open Source Sammlung von Software zur Kontrolle von mobilen Systemen. Die modulare Software bietet Funktionalität im Bereich von Basis-Navigation wie Pfadplanung, Lokalisierung, Prozessüberwachung. Es besteht Hardwareunterstützung für SICK Laserentfernungsmesser und GPS-Empfänger sowie ein zweidimensionaler Simulator für Roboter und Sensoren. Die Software ist in C geschrieben. Für die Kommunikation zwischen den Software-Modulen steht eine eigene IPC (Inter Process Communication)-Bibliothek zur Verfügung. Verschiedene Robotikplattformen werden unterstützt. Die Software wird unter der GPL (Gnu Public License) vertrieben. Weitere Informationen finden sich auf der angegebenen Projekthomepage sowie unter [Thr+00] und [Thr02].

[Kla+04] stellt als Ziel des Einsatzes von Robotern allgemein das Erlangen eines höheren Grades an Automatisierung heraus. Teleoperation (als nichtautonomes Verhalten) und Autonomie werden als entgegengesetzte Enden eines Spektrums beschrieben. Ein weiterer Schwerpunkt sind die unterschiedlichen Roboterkontrollarchitekturen. Bei diesen lassen sich im Wesentlichen zwei Konzepte festmachen: zum einen die „klassische“ KI (Künstliche Intelligenz), welche auf deliberativen Aspekten beruht und somit Wissensrepräsentation, Planung und Schlussfolgerung favorisiert (s. z.B. [Nil84]); zum anderen die von Brooks formulierte verhaltensbasierte („behavior-based“) Robotersteuerung (z.B. [Bro86]), bei welchen die reaktiven, also auf schneller Sensor-Aktuator-Rückkopplung basierenden Komponenten im Vordergrund stehen. Moderne Kontrollarchitekturen enthalten oft beide Ansätze, was nicht selten

zu Problemen führt, da eine Harmonisierung zwischen den schnellen reaktiven und den oft langsameren deliberativen Anteilen der Steuerung notwendig ist. Diese Probleme sind noch nicht vollständig gelöst.

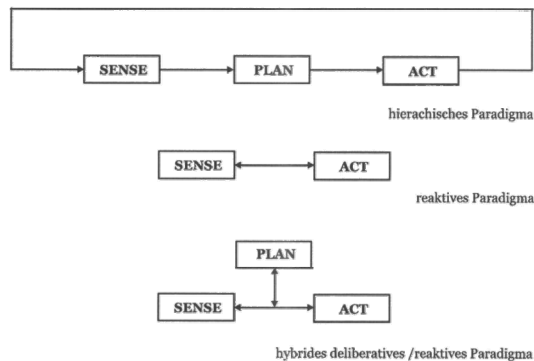


Abbildung 2-12: Die verschiedenen Roboterparadigmen (aus [Ewa05])

Zum selben Thema äußert sich auch [Ewa05]. In dieser Arbeit werden drei verschiedene Paradigmen vorgestellt. Die Funktionen eines Roboters werden in die Kategorien SENSE (Auslesen von Sensorinformationen und Generierung von Informationen daraus), PLAN (Generierung von Aufgaben aus zur Verfügung gestellten Informationen) und ACT (Generierung von Befehlen für die Aktuatoren von Robotern) zusammengefasst. Vorgestellt werden die drei Paradigmen „hierarchisch“, „reaktiv“ und „hybrid“ (s. Abbildung 2-12), welche sich direkt mit den zuvor beschriebenen Kontrollarchitekturen vergleichen lassen.

Als Beispiel für eine hierarchisch umgesetzte Realisierung zur Steuerung eines mobilen Systems sei auf das Rational Behaviour Model (RBM) verwiesen, welches beispielsweise in [Pfü05], [KMB92] oder in [Byr93] beschrieben wird (s. Abbildung 2-13). Dabei handelt es sich um eine Drei-Ebenen Software-Architektur, die sich an den Hierarchieebenen bei der Steuerung mobiler Sys-

teme durch Menschen orientiert. Jede Ebene hat genau definierte Aufgaben. Die strategische Ebene gibt entsprechend strategische Anweisungen an die taktische Ebene. Diese wiederum kreiert konkrete Steuerkommandos, welche an die ausführende Ebene übergeben und von dort ausgeführt werden. In umgekehrter Richtung laufen Sensorinformationen nach oben. Wie in Abbildung 2-13 dargestellt, nimmt dabei die Taktzeit üblicherweise in den oberen Ebenen zu. Die ausführende Ebene, welche die Durchführung der Steuerkommandos an den Aktoren des Roboters überwacht, muss im Allgemeinen häufiger zum Einsatz kommen als etwa die strategische Ebene.

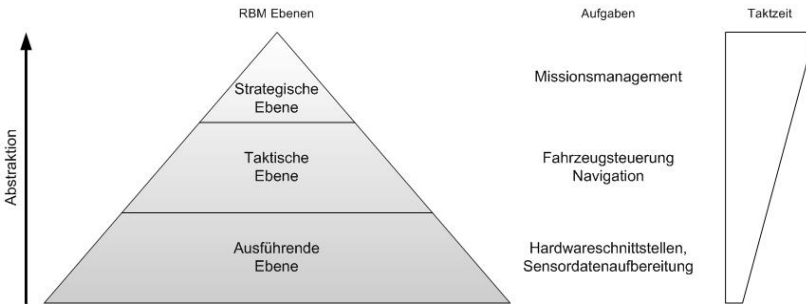


Abbildung 2-13: Das Rational Behaviour Model (aus [Pfü05])

Eine entsprechende Softwarearchitektur wurde für ein autonomes Unterwasserfahrzeug (*DeepC*) in [Pfü05] beschrieben und ist als Auszug in Abbildung 2-14 dargestellt. Auf der fähigkeitsbasierten Ebene sind die grundlegenden Module zur Fahrzeugsteuerung angesiedelt, wie Autopilot, Module zur Sensordatenfusion sowie Schnittstellen zur Fahrzeughardware beziehungsweise einer Simulationsumgebung. Ebenso finden auf dieser Ebene die Generierung des Navigationsdatensatzes und die Ermittlung von Hindernissen aus den Sensordaten statt. Auf der mittleren Ebene werden die komplexen Manöver des Missionsplans in Basismanöver für den Autopiloten umgewandelt. Ebenso erfolgt eine Hardware Diagnose und die Konstruktion von Handlungsvorschlä-

gen im Falle von detektierten Defekten. Ebenfalls ist auf dieser regelbasierten Ebene ein Hindernisvermeidungssystem realisiert, welches auf Basis der erkannten Hindernisse den Pfad auf Kollisionen überprüft und gegebenenfalls Umplanungen vornimmt (s. auch [Eic04] und [Eic07]). Auf der obersten, wissensbasierten Ebene ist das intelligente Missionsmanagement angesiedelt, welches als zentrales Entscheidungsorgan für die Koordinierung der Ausführung aller Programme verantwortlich ist und frühzeitig ein Fehlverhalten einzelner Einheiten des AUV erkennen soll.

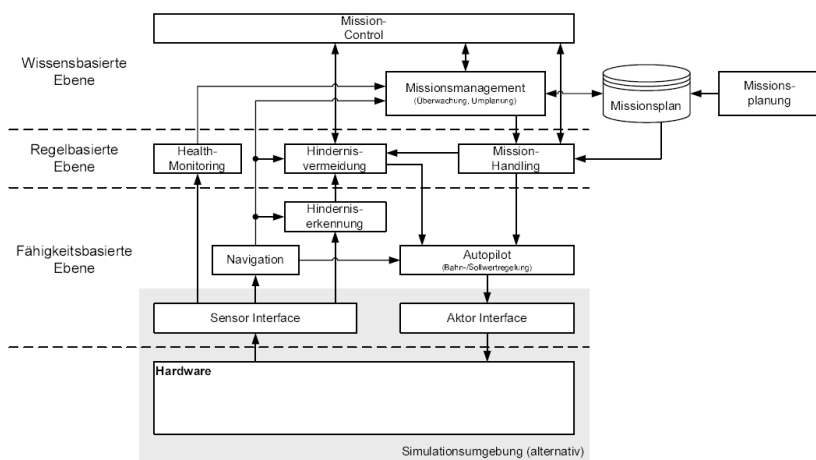


Abbildung 2-14: Softwarearchitektur des AUVs *DeepC*, Auszug (aus [Pf05])

Die Probleme in der Gestaltung der Kontrollsoftware für Roboter steigern sich weiter bei der Herausforderung, autonome Teams als kooperierende Systeme zu realisieren. Motive für den Einsatz ganzer Fahrzeugteams sind vielfältig. Eine einfache Aufgabenstellung könnte bereits das Fahren in einer geschlossenen Formation sein. In Abbildung 2-15 wird dies exemplarisch mit den am Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik der Technischen

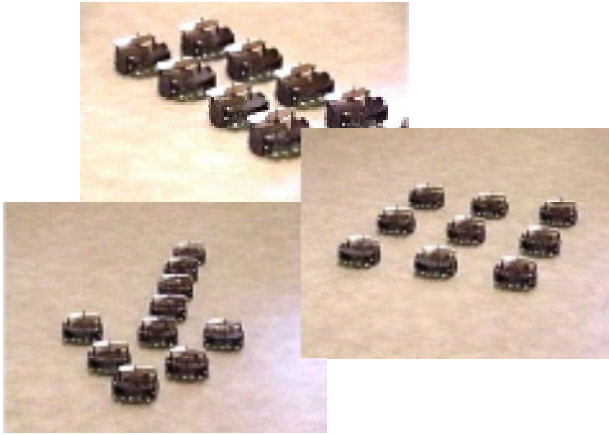


Abbildung 2-15: „MauSI“-Roboter in Formation

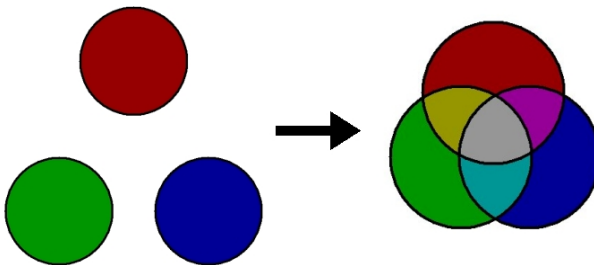


Abbildung 2-16: Abstraktes Beispiel für Emergenz

Universität Ilmenau zum Einsatz kommenden „MauSI“-Robotern dargestellt (Kapitel 4.1 sowie [AA01]). Besonders für Search & Rescue -Einsätze, aber auch im Bereich der Landminensuche können Formationen die Missionszeit verkürzen und gleichzeitig ein koordiniertes, vollständiges Abfahren eines gegebenen Geländeabschnittes gewährleisten. Doch der gleichzeitige Einsatz mehrerer Systeme muss nicht auf starre Formationsfahrten beschränkt werden; es sind die unterschiedlichsten Einsatzformen denkbar. Ziel einer solchen Umsetzung ist allgemein das Erlangen von Systemsynergie oder Emergenz

[Joh01], [EKS95]. Emergenz bedeutet, dass die Fähigkeiten des Teams mobiler Systeme die Summe der Fähigkeiten der einzelnen Systeme übersteigen. Das bedeutet beispielsweise, dass zwei kooperierende Systeme nicht nur in der Lage sind, doppelt so viel zu leisten wie ein einzelnes System, sondern dass ihnen neue Fähigkeiten entstehen könnten, welche ein einzelnes System nicht hat. In Abbildung 2-16 ist dazu ein abstraktes Beispiel gegeben: Drei Farbkreise (rot, grün und blau), welche bei Überlagerung vier neue Farben entstehen lassen.

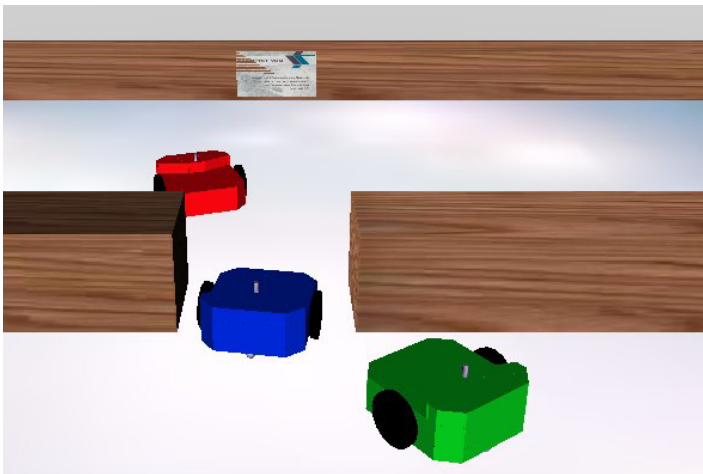


Abbildung 2-17: Nachstellung des "Bullaugen-Problems"

Ein praktisches Beispiel wäre etwa das Eindringen von autonomen Unterwassersystemen in ein versunkenes Schiff durch ein Bullauge („Bullaugen-Problem“). Wenn das einzelne System nur mit Frontsensoren ausgestattet ist, besteht die Gefahr des Anstoßens, besonders bei Vorliegen einer stärkeren Strömung. Durch den Einsatz mehrerer kooperierender Systeme kann diese Gefahr ausgeschaltet werden. Während ein System das Bullauge oder allgemein

die Endstelle passiert, überwachen die anderen Systeme mit ihren Frontsensoren, dass der nötige Abstand eingehalten wird. Dabei kommt es zur Emergenz: Das Team entwickelt die Fähigkeit, die Engstelle gefahrlos zu passieren, was ein Einzelsystem nicht konnte. In Abbildung 2-17 ist die beschriebene Situation in der virtuellen Realität mit „MauSF“-Robotern nachgestellt.

Als Beispiel aus der Biologie könnten Ameisen betrachtet werden. Obwohl eine einzelne Ameise als relativ schwach angesehen werden kann und kaum überleben könnte, sind Ameisenschwärme unglaublich leistungsstark und widerstandsfähig. Ameisenschwärme werden daher oft auch in der Forschung zu mobilen Systemen als Vorlage verwendet [DDCS02], [DMC96]. Besonders im Bereich der Fahrzeugverbände existieren bisher hauptsächlich Konzepte und Vorstellungen sowie erste Teilrealisierungen. Das Ziel der Erlangung einer Kooperation mobiler Systeme steht in einem gewissen Widerspruch zur Forderung nach Autonomie, was auch im Kapitel 2.4 dargelegt wird.

2.3 Vorstellung ausgewählter mobiler Systeme

Im Folgenden sollen einige mobile Systeme mit ihren Einsatzgebieten vorgestellt werden. Damit soll die Themenvielfalt in diesem Bereich aufgezeigt werden. Die Aufzählung erhebt keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit; es soll lediglich gezeigt werden, wie groß die Bandbreite sowohl der Systeme, als auch der Anwendungen ist.

Im Bereich der bereits kommerziell vertriebenen mobilen Systeme nehmen Systeme zur Sprengstoffbekämpfung (EOD) eine sehr große Rolle ein. Einsatzmotiv ist der Schutz des Menschen, welcher die Entschärfung von Sprengstoff durch das System aus großer Distanz und somit in Sicherheit

ausführen kann. Auf die Erfahrung der Experten kann dabei nicht verzichtet werden, daher werden diese Systeme zumeist teleoperiert. Ein weiteres Merkmal ist der Manipulatorarm, um Entschärfungsvorgänge durchzuführen. Als Beispiel für ein solches EOD-System wird auf den Andros F6A von Northrop Grumman / Remotec verwiesen [Rem09]. Dabei handelt es sich um ein geländegängiges System mit der Fähigkeit zum Treppensteigen, welches teleoperiert eingesetzt wird. Die Kommunikation mit einem entsprechenden Bediengerät kann über Kabel, Glasfaser oder Funk erfolgen. Das System verfügt über mehrere Fernsehkameras und einen Manipulatorarm, welcher mit unterschiedlichen Manipulatoren bestückt werden kann.

Ein weiteres mobiles System ist der PackBot der Firma iRobot [Iro05], welcher gegenwärtig beim amerikanischen Militär im Einsatz steht. Der PackBot verfügt über ein separates Kettensegment vorne, welches seine Mobilität verbessert und ihm das Treppensteigen erlaubt. Der PackBot hat die Ausmaße (LxBxH) 0,67 m (0,88 m mit ausgestrecktem Kettensegment) x 0,41 m x 0,18 m und wiegt in voller Beladung 18 kg. Das System verfügt über sechs Nutzlastports und kann daher in unterschiedlichen Einsatzszenarien zum Einsatz kommen.



Abbildung 2-18: Das Robotersystem Mustang F01 (Bild zu Verfügung gestellt vom Fraunhofer AST Ilmenau)

Als Beispiel für größere mobile Systeme wird auf das mobile System Mustang F01 (Mobiles Unterstützungssystem zur Aufklärung, Nachrichtengewinnung und Gefahrenabwehr) des Fraunhofer AST Ilmenau verwiesen. Dieses stellt einen Systemdemonstrator dar für ein mobiles Assistenz- System mit Einsatzpotential im zivilen und militärischen Sicherheitssektor. Das aus einem anderen Einsatzbereich übernommene Basisfahrzeug kann mit einem Gewicht von 350 kg in eine mittlere Robotikklasse eingeordnet werden. Das Fahrzeug verfügt über ausgezeichnete Geländegängigkeit durch zwei lenkbare Achsen und der Fähigkeit zu Längs- und Querneigung bis 40%. Ein serieller Antriebshybrid aus Verbrennungsaggregat und Akkumulatoren ermöglicht eine Einsatzgeschwindigkeit von bis zu 20 km/h und Reichweiten von etwa 200 Kilometer. Arbeiten am Fraunhofer AST Ilmenau ermöglichen bisher einen Zugriff auf den fahrzeuginternen CAN-Bus sowie eine Drive-by-Wire- Fähigkeit über eigens integrierte Hard- und Software. Das Fahrzeug kann sowohl bemannt als auch unbemannt bewegt werden. Speziell für den unbemannten Einsatz wurde vom Fraunhofer AST Ilmenau ein Sensorkopf konstruiert mit 6 CCD-Kameras (schwerpunktmäßig zur Fahren), Hochleistungs-Zoom-Zylinderkamera für Beobachtungsaufgaben sowie einem Infrarot- Bolometer (Detektion von Wärmesignaturen). Weitere Sensoren sind vorhanden zur Lokalisation und zur Erfassung von Fahrzeugzuständen. Im aktuellen Stadium kann das Fahrzeug vollständig tele-operiert werden. Dazu wurde vom Fraunhofer AST Ilmenau die erreichte Drive-by-Wire-Fähigkeit um eine digitale Funkstrecke mit Daten- und Videokanal erweitert. Der Einsatz digitaler Funktechnik stellt eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu der häufig verwendeten, billigeren Analogtechnik dar. So gewährleistet der Mustang F01 eine Onlineübertragung eines Videobildes bei bewegtem System und im urbanen Umfeld (keine Sichtverbindung zwischen Bediener und Fahrzeug) bis zu einem Kilometer. Eine Fernbedienung ermöglicht die Steuerung des Fahrzeuges, die Auswahl des zu übertragenden Videobildes sowie die Anzeige aktueller Status-

informationen. Das Videosignal kann auch auf jedem Monitorsystem angezeigt werden.

Wie bereits aufgeführt wurde, spielen mobile unbemannte Systeme auch bei der Erforschung der Oberflächen anderer Planeten und Monde eine Rolle. An dieser Stelle sollen zwei in Deutschland konstruierte Systeme vorgestellt werden, welche für einen Einsatz auf dem Planeten Mars ausgelegt sind. Beide sind für dasselbe Ausgangsszenario ausgelegt, welches in [Sch+97] beschrieben wird: Sie sollen in einem Landungsmodul auf der Planetenoberfläche aufsetzen und sich dann kabelgeführt in der Umgebung bewegen, wobei teilautonome Fähigkeiten vorhanden sind. Die Kommunikation zur Erde erfolgt über das Landungsmodul und einen Satelliten im Marsorbit zur Basisstation auf der Erde. Dabei bleibt anzumerken, dass die Signallaufzeit auf der Strecke Erde-Mars zwischen 4 und 21 Minuten variiert (einfache Strecke) und aufgrund der Konstellation der Planeten und des Satelliten nur etwa eine Stunde am Tag Kontakt besteht.

Die mit verschiedenen wissenschaftlich genutzten Sensoren ausgestatteten Fahrzeuge führen ein aufgerolltes, 60 Meter langes Kabel mit sich, um Ressourcen des Landungsmoduls (Energie, Rechenkapazität) nutzen zu können und dadurch eigene Masse zu sparen. Die Masse der Fahrzeuge ist auf 5 Kilogramm begrenzt. Weitere technische Daten sind eine Lebensdauer von etwa 200 Tagen bei einer Gesamtbewegungsdauer von 50 Stunden. Im Einsatzgebiet von 20 Metern um das Landungsmodul bewegen sich die Fahrzeuge mit einer Geschwindigkeit von bis zu 5 Metern pro Stunde, wobei Hindernisse bis zu einer Höhe von 10 Zentimetern und Steigungen von 15° (bergauf und seitwärts) bzw. 20° (bergab) überwunden werden können. Die Fahrzeuge müssen auf einem Raum von 0,03 Kubikmetern unterzubringen sein beim Aufsetzen Beschleunigungen von bis zu 25 g überstehen. Während der Mission müssen sie mit den physischen Gegebenheiten auf dem Mars zurechtkommen, dies beinhaltet eine Gravität von 3,7 Meter pro Quadratsekunde, Staub,

horizontale Winde bis 9 Metern pro Sekunde und Temperaturen im Bereich von -130° bis 25° Celsius.

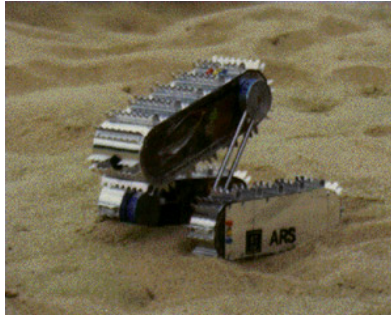


Abbildung 2-19: Das Fahrzeug IDD [Sch+97]

Die beiden folgenden Fahrzeuge erfüllen diese Rahmenbedingungen. Der „Instrument Deployment Device“ (IDD) (Abbildung 2-19) ist eine Gemeinschaftsentwicklung des Steinbeis Transferzentrum ARS (Angewandte Rechner- und Softwaretechnologie), des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt und der Firma Jungius Electronic Systems. Das Fahrzeug besteht aus drei Segmenten, welche durch zwei Traversen miteinander verbunden sind. Durch Drehungen dieser Segmente wird die Fortbewegung des Fahrzeuges realisiert. Dabei lassen sich Hindernisse überwinden, und das Fahrzeug kann auch nach Stürzen in jeder möglichen Lage weiteroperieren. Nachteilig wirken sich die komplizierte Steuerung und ein zu hoher Energiebedarf bei Bewegung (8 – 10 Watt) aus.

Die Forderungen nach einfacherer Steuerbarkeit und besserer Energieeffizienz bietet der „Mobile Instrument Deployment Device“ (MIDD), entwickelt vom Steinbeis Transferzentrum ARS an der FH Ravensburg-Weingarten. Das Fahrzeug ist in der Abbildung 2-20 links dargestellt. Auf der Abbildung wird auch seine Fähigkeit deutlich, die Vorderräder zu verschieben und dadurch das

Chassis anzuheben bzw. abzusenken. Dadurch lassen sich verschiedene Betriebszustände einnehmen, etwa der Lagerungszustand bei möglichst geringen Ausmaßen, ein Messzustand, bei welchem der Boden des Fahrzeugs flach auf dem Erdboden aufliegt, sowie der Fahrzustand, welcher die Vorderseite des Fahrzeugs vom Erdboden abhebt und auch die geforderten Hindernisse überwinden kann. Das Zentrale Gehäuse ist 33 Zentimeter lang und 18 Zentimeter breit und hoch.

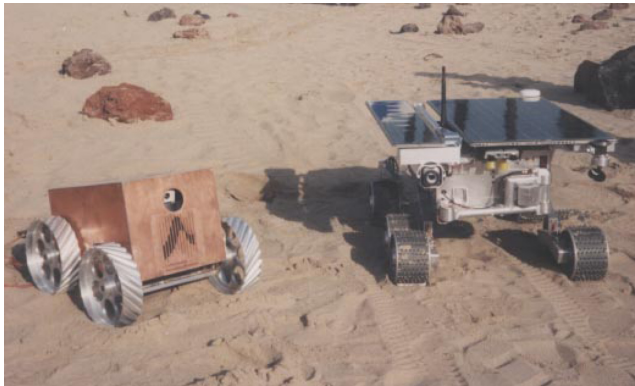


Abbildung 2-20: Zwei Mars-Rover, links der Mobile Instrument Deployment Device (MIDD), rechts der Rocky VII vom Jet Propulsion Laboratory der NASA [SRR00]

Im maritimen Bereich finden sich bereits verschiedene autonome Systeme im regelmäßigen Einsatz im Rahmen von industriellen, wissenschaftlichen und militärischen Anwendungen. Als Beispiel sei das System *SeaOtter* der deutschen Firma ATLAS ELEKTRONIK aufgeführt (s. Abbildung 2-21 und Abbildung 2-22). Dieses 3,45 m lange maritime Fahrzeug hat ein Gewicht von 1100 kg und erreicht eine Geschwindigkeit von bis zu 8 kn (14,8 km/h). Die maximale Tauchtiefe beträgt 600 m, die maximale Einsatzzeit 24 h. Das Fahrzeug wurde im Stil eines flachen Fisches entworfen. Dies garantiert eine gute Stabilität sowohl im Wasser als auch an der Oberfläche. Des Weiteren lassen sich dadurch auch größere Sensoren leicht anbringen. Das Fahrzeug lässt sich über

eine Konsole direkt steuern (ROV = Remotly Operated Vehicle) oder im autonomen Modus betreiben (AUV = Autonomous Underwater Vehicle). Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Konsole kann über ein Glasfaserkabel erfolgen oder kabellos über Funk (nur im aufgetauchten Zustand) oder ein akustisches Modem. Das System verfügt über eine sehr gute Manövrierbarkeit. Im Besonderen ist es möglich, mit Hilfe einer vertikalen Schubdüse eine Tauchtiefe auch ohne Vorwärtsbewegung zu halten. Viele vergleichbare Systeme haben diese Fähigkeit nicht, da solche Systeme meistens mit positivem Auftrieb konzipiert werden und sofort mit dem Auftauchen beginnen, wenn keine Vorwärtsbewegung mit entsprechender Abtriebserzeugung an Tragflächen erfolgt.



Abbildung 2-21: Das unbemannte maritime Fahrzeug *SeaOtter*

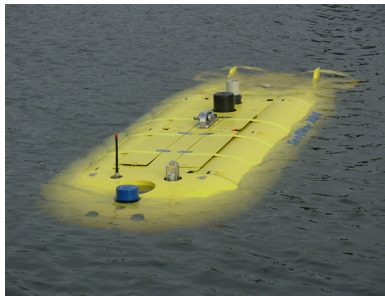


Abbildung 2-22: Der SeaOtter im Einsatz

Bilder zur Verfügung gestellt von ATLAS ELEKTRONIK GmbH, Bremen

Die Vorstellung der vorhandenen Systeme zeigt, dass unbemannte Fahrzeuge in allen erdenklichen Größen konzipiert und teilweise gebaut werden. Bei den kommerziell erhältlichen Systemen handelt es sich zumeist um teleoperierte Systeme mit einigen Assistenzfunktionen zur Entlastung des Bedieners. Hochautonome Systeme sind meist noch im Versuchsstadium oder existieren erst als Konzeptstudie. Die genaue Festlegung von Fahrzeugeigenschaften zwi-

schen den Extremwerten „teleoperiert“ und „autonom“, die sich im allgemeinen Verständnis oft diametral gegenüberstehen, stellt ein Hauptproblem in der aktuellen Forschung dar. Dies wird tiefergehend im Kapitel 2.4 aufgezeigt und daraus die Zielstellung dieser Arbeit abgeleitet.

2.4 Zielstellung der Arbeit

In verschiedenen Forschungstätigkeiten am Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik der Technischen Universität Ilmenau ([AA01], [FSA04], [FSA06]), bei welchem der Autor mitwirkte (z.B. [AGW02], [GKW03], [WG03], [Glo03], [Glo04a], [Glo04b]), trat ein umfassendes Problem mit der Definition des Begriffs „Autonomie“ in der mobilen Robotik auf. Dieses Problem soll im Folgenden aufgezeigt werden, bevor im weiteren Verlauf ein Lösungsvorschlag unter Verwendung des Konzeptes der Bioorientierten Adaptiven Autonomie unterbreitet wird. Die Umsetzung dieses Konzeptes in verschiedenen Simulationen ist Inhalt der Kapitel 4 und 5. Dabei wird in dieser Arbeit ein Schwerpunkt auf die Realisierung von Teams autonomer Systeme gelegt.

„Autonomie“ ist ein oft genanntes Ziel in Forschungsaktivitäten im Bereich von mobilen, unbemannten Fahrzeugen. Allerdings gibt es keine verbindliche, allgemeingültige Definition, was Autonomie eigentlich bedeutet und welche Fähigkeiten ein mobiles System aufweisen muss, um als autonom bezeichnet werden zu können. Es liegt nahe, dass ein autonomes System bestimmte Aufgaben selbständig, ohne Eingriff eines menschlichen Operators erfüllen muss. Doch genauere Beschreibungen weichen voneinander ab. Im Folgenden sind einige Veröffentlichungen als Beispiele aufgeführt, welche sich mit autonomen Systemen beschäftigen und verschiedene Definitionen angeben.

In der bereits aufgeführten Studie [Kla+04] wird ein Definitionsansatz ausgehend vom Begriff „Automatisierung“ gewählt. Als Automatisierung wird nach DIN 19233 bezeichnet: *„Einsatz von künstlichen (technischen) Mitteln, damit ein Vorgang selbständig abläuft, also ganz oder teilweise ohne Mitwirkung und Überwachung von Menschen“*. Es wird festgestellt, dass bei hochautomatisierten technischen Anlagen, beispielsweise Industrierobotern, die bekannte und normierte Arbeitsumgebung wichtige Grundlage der Automatisierung sei. Bei mobilen Systemen müsse man jedoch von natürlichen und somit unkontrollierten Umgebungen ausgehen. Dafür wird der Begriff Autonomie folgendermaßen definiert: *„...das zweckmäßige und zielgerichtete Ausführen von Steuerungen und Aktionen durch technische Systeme (Roboter, Software) ohne Mitwirkung oder Überwachung von Menschen in einer vorab nicht vollständig bekannten oder definierten Umgebung.“* Diese Definition beruht also sehr stark auf dem Charakter des Einsatzgebietes.

Oftmals hängt die im Einzelfall gewählte Definition für autonomes Verhalten von der konkreten Aufgabenstellung ab. Edlinger sagt in [Edl97]: *„Ein mobiler Roboter soll eine zunächst unbekannte Umgebung autonom erkunden und dabei ein Modell seiner Umwelt erstellen, das zur automatischen Planung von Fahrten innerhalb der erfassten Umgebung geeignet ist.“* In diesem Fall wird also die Fähigkeit des Roboters, selbständig seine Umgebung zu kartografieren und somit Fahrtrouten durchführen zu können, als ein wesentliches Merkmal der Autonomie dargestellt (s. auch Beschreibung SLAM in Kapitel 2.2.1).

Ein wesentlicher Gedanke bei der Autonomie ist in vielen Fällen das Nichtvorhandensein eines menschlichen Bedieners und somit die Fähigkeit des Systems, sich auf veränderte Situationen anpassen zu können. Beispielsweise wird von Pfützenreuter in [Pfü05] definiert: *„Ein Autonomes Mobiles System soll in einer (bekannten oder unbekannten) Umgebung komplexe Aufgaben lösen, ohne ständigen Kontakt zu einem menschlichen Operator zu haben.“* Es wird also die Fähigkeit zu selbständigem Handeln und die Adaptionfähigkeit an komplexe Situationen in den Vordergrund gestellt. Im Gegensatz zu den Definitionen von [Kla+04]

und [Edl97] wird an dieser Stelle ausdrücklich auch eine bereits bekannte Umgebung als Einsatzort für ein autonomes System zugelassen.

Für einen „autonomen Agenten“ findet man folgende Definition in [Smi95]: *„An agent is autonomous if it is able to cope with all the consequences of its actions to which it is subjected while remaining viable as a task-achieving agent in the world it operates in.“* Es wird also generell Wert gelegt auf die Fähigkeit, mit den Konsequenzen seines Handelns umgehen zu können.

Im Kapitel 2.1 wurde das *U. S. Army Robotic Follower Advanced Technology Demonstration* Programm bereits kurz vorgestellt. Auch in diesem Projekt ist zu hinterfragen, ob die unbemannten Folgeeinheiten als „autonom“ angesehen werden sollen oder nicht, da sie im allgemeinen einem vom Menschen direkt gesteuertem System oder dem Menschen direkt folgen.

Diese Ausführungen zu Definitionen des Begriffs „autonomes System“ könnten mit beliebig vielen weiteren Literaturstellen ergänzt werden, doch es soll nur ein kleiner Überblick über vorhandene Ansichten gegeben werden. In jedem vorgestellten Fall haben die jeweiligen Autoren ihre Definition auf Grundlage ihrer eigenen Aufgabenstellungen gewählt. Generell wird dabei an dieser Stelle die Kritik erhoben, dass diese Ansätze deutliche Widersprüche zueinander aufweisen und in vorliegender Form nicht nebeneinander existieren können. In [Kla+04] wird beispielsweise in der zitierten Textstelle der Einsatz in unbekanntem Terrain als wesentliches Merkmal von Autonomie im Gegensatz zur Automatisierung in bekanntem und kontrollierbarem Gelände dargestellt (damit wären kleine führerlose Transportfahrzeuge in großen Fabrikationsanlagen keine autonomen, sondern automatisierte Systeme). Pfützenreuter hingegen lässt in seiner Definition ausdrücklich auch bereits bekannte Umgebungen zu. Er stellt in seiner Definition das Nichtvorhandensein eines ständigen Kontaktes mit dem menschlichen Operator in den Vordergrund, was im Falle der von ihm untersuchten Anwendungsfälle im Unterwasserbereich und der schlechten Kommunikationsmöglichkeit nahe liegt. Bei Edlingers Definiti-

on wird wieder eine unbekannte Umgebung vorausgesetzt, welche durch Erkundung und Kartografisierung jedoch erforscht werden soll. Auch in diesem Fall wurde die Definition also durch die konkrete Aufgabenstellung beeinflusst. [Smi95] äußert sich weder zum Bekanntheitsgrad des Einsatzgeländes noch zur Einbeziehung eines Operators. Er erhebt die Fähigkeit des Systems zur Aufrechterhaltung der Einsatzfähigkeit (*remaining viable*) im Rahmen der vorgenommenen Aktionen und deren Konsequenzen (*consequences of its actions*) zum wesentlichen Merkmal der Autonomie.

Dadurch wird die Widersprüchlichkeit der vorgestellten Konzepte deutlich. Prinzipiell wäre es denkbar, dass ein mobiles System nach der einen Definition autonom ist, nach der anderen jedoch nicht. Solche unterschiedlichen Definitionen und Sichtweisen können natürlich große Probleme in gemeinsamen Projekten und weiterführenden Arbeiten verursachen. Die generelle Forderung, dass ein mobiles System gewisse Handlungen selbständig ausführen muss, um als autonom bezeichnet werden zu können, führt zu einer Reihe von Fragen, die im folgenden gestellt werden sollen:

- Darf ein autonomes System während seines Einsatzes mit einem Zentralcomputer oder anderen technischen Geräten kommunizieren? Bei mobilen Systemen, welche eine bestimmte Größe nicht überschreiten, wird meistens die Rechenleistung geringer sein als die eines handelsüblichen PCs, der als Zentralrechner eingesetzt werden könnte. Für die mobilen Systeme kommt oft eine zweiteilige Hardwarehierarchie aus einem besseren Rechner für rechenintensive Anwendungen (z.B. Embedded PC) und einem kleineren System (z.B. Mikrocontroller) für zeitkritische Anwendungen zum Einsatz [Kla+04]. Die Weitergabe gewisser Daten an einen Zentralrechner, damit dieser Aktionen mit höchstem Rechenaufwand ausführt (z.B. Echtzeit-Bildauswertung), kann vorteilhaft sein (sofern eine geeignete Kommunikationsverbindung besteht). Allerdings arbeitet das System dann e-

ben nicht total selbständig. Macht man dies zur Voraussetzung für Autonomie, so dürfte ein autonomes System genau genommen nicht einmal Satteliten-Navigationssysteme wie GPS benutzen, da auch in diesem Fall Daten von externen technischen Geräten benötigt würden. Dadurch könnte „Autonomie“ zu einem Nachteil werden.

- Darf ein menschlicher Operator in die Missionsausführung eines autonomen Systems eingreifen? Nach der generellen Vorstellung, dass „autonom“ für die mobilen Systeme soviel wie „selbständig“ bedeutet, würde man diese Frage verneinen. Aber bei Missionen von mobilen Systemen kann in gewissen Situationen der Eingriff eines Menschen von großem Vorteil sein. Der Mensch ist mit seinen kognitiven Fähigkeiten jedem technischen System deutlich überlegen. Somit kann sein Beitrag, besonders in Situationen, wo eine Gesamtsituation anhand von Videobildern beurteilt werden muss, überaus hilfreich sein. Nachteilig wirkt sich dabei aus, dass durch die Datenübertragung und die Kognitionszeit des Menschen eine größere Totzeit im System entstehen kann. Für den Einsatz eines Menschen in bestimmten Situationen sprechen auch ethische sowie rechtliche Gründe. Dies gilt besonders bei mobilen Systemen mit Manipulatormodulen, welche Handlungen mit möglichen schwerwiegenden Konsequenzen ausführen können. Als Beispiel wären Waffensysteme zu nennen, welche auf mobilen Systemen bei Militär oder Polizeikräften zum Einsatz kommen können. Bei allen entsprechenden Projekten des Institutes für Automatisierungs- und Systemtechnik wurde stets die Ansicht vertreten, dass für solche Aktionen jedes Mal ein menschlicher Bediener die volle Verantwortung, auch im juristischen Sinne, übernehmen muss. Voraussetzung dafür ist, dass er entsprechende Aktionen immer direkt auslösen muss. Allerdings soll das mobile System natürlich auch möglichst zur Entlastung des Operators beitragen und andere Aktionen selbständig durchführen können. Es wäre wünschenswert, wenn diese

Kombinationen mit der Vorstellung von „Autonomie“ vereint werden könnten.

- Welche Aktionen muss ein System in welcher Komplexität ausführen können, um als „autonom“ bezeichnet werden zu können? Wie an der Definition aus [Edl97] zu sehen, kann die Definition von Autonomie über den Einsatzzweck des mobilen Systems erfolgen. Doch erscheint es sinnvoll, verschiedene Aufgaben in der Definition trennen zu können. Ein einfaches fernsteuerbares Modellauto, wie es in jedem Modellbaugeschäft zu erwerben ist, kann durch einfache Manipulation befähigt werden, nach dem Einschalten ohne weitere Eingriffe kontinuierlich geradeaus zu fahren. Nach der Forderung, selbständig ohne menschlichen Eingriff arbeiten zu können, wäre dieses Fahrzeug vollautonom. Doch es ist einsichtig, dass dieses Fahrzeug nicht mit anderen, realitätsnahen Anwendungen, etwa autonom operierenden Unterwasserfahrzeugen, verglichen werden kann. Auch bei den realitätsnahen Anwendungen gibt es unterschiedlich komplexe Konstruktionen. Gemäß den oben gemachten Ausführungen zum Thema Einsatz eines Operators würde es vorteilhaft sein, wenn verschiedene Aktionsklassen unterscheidbar und getrennt aktivierbar oder deaktivierbar wären. Dadurch könnte das Auslösen von Vorgängen mit gefährlichen Konsequenzen dem Operator vorbehalten bleiben. Darüber hinaus könnte auch das Fahrzeug in Abhängigkeit der aktuellen Situation verschiedene Funktionen ausführen. Beim Auftreten bestimmter Schwierigkeiten könnten bestimmte Aktionen gesperrt werden.
- Können mehrere „autonome“ Systeme als Team zusammenarbeiten? Die Realisierung von ganzen Teams oder Schwärmen von autonomen Systemen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Dabei wird nicht immer klar zwischen den Begriffen Team, Schwarm, Rudel, Rotte o.ä. unter-

schieden. In [Kla+04] wird der Begriff Team für eine sehr eng zusammenarbeitende Gruppe mobiler Systeme verwendet, während der Begriff Schwarm allgemeiner gehalten wird. Unabhängig von der genauen Festlegung der Begriffe entsteht die Schwierigkeit, dass zwischen (möglichst hoher) Autonomie der einzelnen Roboter und Kooperation in einer Gruppe ein klarer Widerspruch steht. Ein Roboter kann nicht gleichzeitig selbständig operieren und kooperieren. Wenn gleich dieses Problem manchmal als „falsches Problem“ abgetan wird, weil ja der Schwarm als solches wiederum autonom angesehen werden kann, so spielt der beschriebene Umstand doch bei der technischen Realisierung eine wichtige Rolle. Wenn zwei Systeme miteinander kooperieren und kommunizieren und das eine System das andere über entsprechende Kommandos vollständig lenkt (Master-Slave-Prinzip), so ist das Slave-Fahrzeug vollständig ferngesteuert. Ob die Befehle von einem menschlichen Operator per Fernsteuerung oder von einem anderen technischen System über einen beliebigen Kommunikationsweg stammen, ist für die Umsetzung des Slave-Fahrzeuges ohne Bedeutung. Allerdings wäre es wünschenswert, wenn das System bei Ausfall des Master-Fahrzeuges auch selbständig auf die neue Situation reagieren könnte. Auch dabei ergeht somit wieder die Forderung nach einem Autonomiekonzept, welches sich im Einsatz ständig an die aktuellen Gegebenheiten anpasst und so größtmögliche Flexibilität garantiert.

Die aufgezeigten Problemstellungen sollen durch die Verwendung eines zu entwickelnden Autonomiekonzeptes gelöst werden. Dieses Autonomiekonzept muss die oben aufgezeigten, teilweise unterschiedlichen Auffassungen von Autonomie vereinen können. Außerdem sollen gemäß den vier gestellten Fragen unterschiedliche Ausführungen möglich sein, um möglichst vielen Anwendungen gerecht werden zu können. Das Konzept soll also auf möglichst alle Aspekte bei der Steuerung von mobilen Systemen eingehen können.

Als Lösung wird deshalb das Konzept der Bioorientierten Adaptiven Autonomie vorgeschlagen, welches im Kapitel 3 vorgestellt wird.

Als konkrete Aufgabenstellung wird dabei das Durchqueren eines unbekannten Gebietes durch einen Roboter / ein Roboterteam betrachtet. Dieses Szenario wird auf unterschiedliche Art und Weise gelöst werden, was ein Vergleich unterschiedlicher Vorgehensweisen erlauben wird.

3 Ableitung des neuen Konzeptes der Bioorientierten Adaptiven Autonomie

Das Konzept der Bioorientierten Adaptiven Autonomie, deren Grundlagen vom Autor etwa in [WG03], [Glo04a] und [Glo06] vorgestellt wurden, hebt die starre Definition des Begriffes der Autonomie für mobile Systeme auf. Im Fremdwörterlexikon findet man für „autonom“ die Bedeutungen selbständig, unabhängig. Doch weisen bestehende Systeme unterschiedliche Fähigkeiten und Ausprägungen auf, wie bereits gezeigt werden konnte. Adaptive Autonomie wird daher verstanden als Beschreibung des aktuellen Systemzustandes in einem bestimmten Bereich. Die gegenteiligen Begriffe „voll abhängig“ (also ferngesteuert bzw. teleoperiert) und „vollautonom“ werden als Bezeichnungen für die entgegengesetzten Enden dieses Bereiches verwendet. Jedes mobile System nimmt einen Zustand innerhalb dieses Bereiches ein und wird dabei als „autonom“ oder besser als „teilautonom“ bezeichnet. In der Regel wird es dabei eine typspezifische Anzahl von diskreten Zuständen geben, welche vom mobilen System eingenommen werden können.

Ein wichtiges Merkmal des vorgestellten neuen Autonomiekonzeptes ist die Fähigkeit, diese Autonomiegrade während des Einsatzes jederzeit verändern zu können. Dadurch ist es möglich, dass ein Bediener oder ein stationärer Zentralcomputer bei Vorlage entsprechender Informationen dem mobilen System mehr Autonomie gibt, damit es auf entsprechende Situationen vor Ort schneller reagieren kann. Entsprechend kann auch die Autonomie verringert werden, wenn die höhere Ebene einen Anlass sieht einzugreifen. Umgekehrt ist es aber auch wichtig, dass das mobile System selber seinen Autonomiegrad ändern kann. So kann die Bestätigung einer höheren Instanz wie eines menschlichen Bedieners abgefragt werden, wenn das System dafür eine Notwendigkeit sieht. Theoretisch kann der Autonomiegrad auch erhöht werden, wenn durch tech-

nische Defekte keine Verbindung mehr zur zentralen Instanz besteht. Ebenso könnte das mobile System bei Ausfall des Zentralrechners kontrolliert reagieren. Es ist sogar denkbar, dass das System durch selbständige Erhöhung einem menschlichen Bediener Kompetenz entzieht, wenn dessen Fähigkeit zum kompetenten Reagieren in Frage steht (z.B. bei Übermüdung).

3.1 Definition und Struktur der Bioorientierten Adaptiven Autonomie

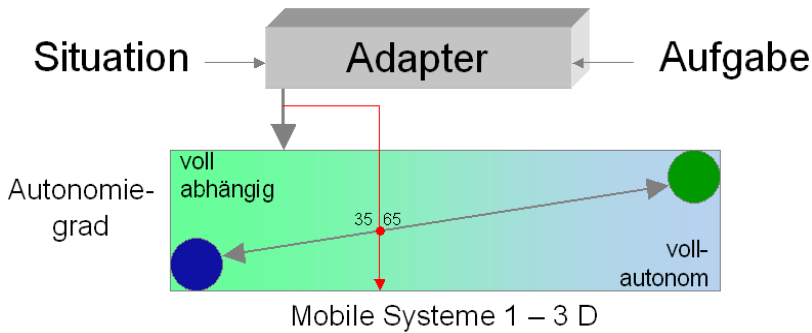


Abbildung 3-1: Der Gesamtbereich bei der Bioorientierten Adaptiven Autonomie

Es wird davon ausgegangen, dass das System seinen Autonomiegrad mit Hilfe eines Adapters verändern kann. Dieser Adapter bestimmt in Abhängigkeit der gegenwärtigen Aufgabe und der mittels Sensorik oder externen Informationen bestimmten Situation den aktuellen Autonomiegrad. Der optimale Entwurf und die Realisierung dieses Adapters stellt eine wesentliche Herausforderung an die Steuerungssoftware bei Verwendung der Bioorientierten Adaptiven

Autonomie dar. Die Grundzüge des Konzeptes sind in Abbildung 3-1 dargestellt.

Zusammengefasst lässt sich das Autonomiekonzept also folgendermaßen neu beschreiben: Verschiedene untergeordnete Elemente eines Gesamtsystems stehen unter der Kontrolle eines übergeordneten „Masterelements“, welches ihre Funktionen weitestgehend steuert (zumindest durch Vorgabe strategischer Entscheidungen, wobei die taktische Ausführung in der Regel dem untergeordneten Element obliegt). Wenn jedoch bestimmte Situationen detektiert werden, löst sich das untergeordnete Element zeitweise aus der Steuerstruktur; es erhöht seinen „Autonomiegrad“ und trifft seine eigenen Entscheidungen, die auch strategischer Art sein können. Durch das Ausschalten der Rückführung über das „Masterelement“ wird die Reaktionszeit verringert. Das Konzept wird als Bioorientierte Adaptive Autonomie bezeichnet, weil entsprechende Zusammenhänge auch in der Biologie beobachtet werden können. So erfolgt die routinemäßige Kontrolle zyklischer Bewegungen bei Wirbeltieren nahezu ausschließlich durch das Rückenmark, wie durch Experimente an dezerbrierten Katzen (Spinalisation) belegt werden konnte. Die verantwortlichen CPGs (nach Grillner, [GW02]) oder Motor primitives (nach Bizzi, [Biz+02]) werden erst dann durch rostrale Strukturen des Nervensystems (Kleinhirn, Basalganglien, Großhirn) übersteuert, wenn die Selbststabilisierungsmechanismen der Peripherie überfordert sind.

Definition 3.1: Bioorientierte Adaptive Autonomie (BAA)

Die Bioorientierte Adaptive Autonomie (BAA) beschreibt ein Autonomiekonzept für mobile Systeme, welches eine Beschreibung und Einordnung vorhandener und zukünftig zu entwickelnder Systeme / Umsetzungen ermöglichen soll. Ziel ist eine Vergleichbarkeit verschiedener Umsetzungen sowie ein einheitliches Verständnis des Begriffs „Autonomie“.

Innerhalb der BAA wird jedem System ein Autonomiegrad zugeordnet, der im Autonomiespektrum zwischen komplett abhängig (ferngesteuert, nicht autonom) und komplett selbständig (vollautonom) liegen kann. Die BAA ermöglicht Systeme, bei welchen der Autonomiegrad während der Mission beliebig oft verändert und der gegebenen Situation und Aufgabe angepasst (adaptiert) werden kann. Diese Adaption kann von einem Menschen (Operator) ebenso wie aber auch vom mobilen System selbst oder von einer Zentralrecheninstanz ausgehen (Adapter).

Im Rahmen der BAA lässt sich das gesamte Spektrum der Autonomie beschrieben. Für jede Umsetzung muss jeweils der oder die sinnvolle(n) Bereich(e), wertdiskret oder wertkontinuierlich, definiert werden, in welche(m) sich der Autonomiegrad eines mobilen Systems bewegen kann.

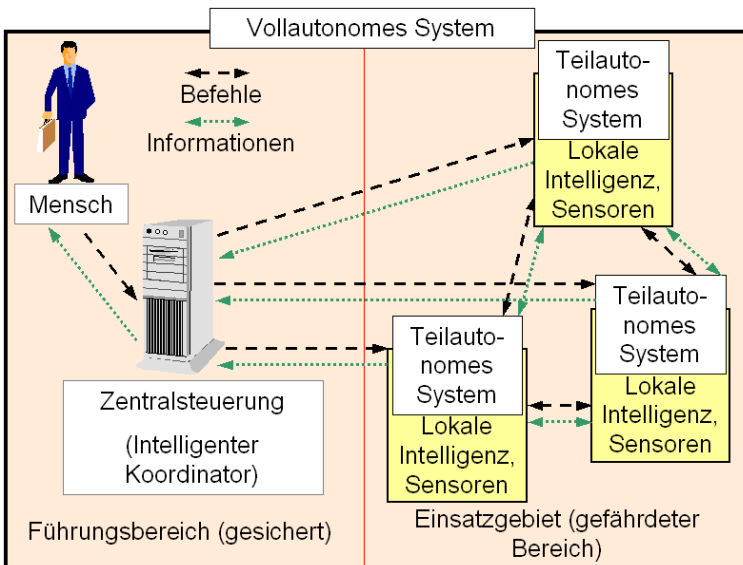


Abbildung 3-2: Einbindung des Menschen zur Führung mobiler teilautonomer Systeme

Bei vielen klassischen Betrachtungen über Autonomie steht der Mensch per Definition zwangsläufig außerhalb der Systemgrenzen des autonomen Systems. Dies ist beim Konzept der adaptiven Autonomie nicht der Fall, wie in Abbildung 3-2 dargestellt wird. Der Mensch kann aufgrund eigener Entscheidung oder Nachfrage von technischen Komponenten Teil des autonomen Systems werden.

Ziel von Forschung und Entwicklung sollte deshalb nicht zwangsläufig die Realisierung eines möglichst hohen Autonomiegrades sein, sondern eines optimal an die Mission angepassten. Bei bestimmten Anwendungen wird sich der Autonomiegrad durch vorhandene Einschränkungen nur in geringen Bereichen bewegen können. So muss ein unbemanntes Unterwasserfahrzeug ohne die Fähigkeit akustischer Kommunikation zwangsläufig meistens im „vollautonomen“ Zustand operieren. Bei bestehenden Kommunikationsmöglichkeiten erscheinen ein regelmäßiger Datenaustausch des mobilen Systems mit einer Zentralstelle und einem Operateur sowie die Möglichkeit der Nutzung externer Daten wie GPS sehr sinnvoll.

Ein solches System wäre dann im Idealzustand nicht „vollautonom“. In den vollautonomen Zustand würde es dann schalten, wenn kommunikative oder andere technische Fähigkeiten ausfallen. Es würde versuchen, durch Notfallmaßnahmen wie der Rückkehr zu einem vereinbarten Treffpunkt Abhilfe zu schaffen. In der Biologie entspräche dieses beschriebene System im vollautonomen Zustand etwa einem autistischen Menschen, der nicht die Fähigkeit zur sozialen Interaktion mit seiner Umgebung besitzt.

3.2 Bioorientierte Adaptive Autonomie unter regelungstechnischen Aspekten

Kernpunkt des Konzeptes der Bioorientierten Adaptiven Autonomie ist die Beschreibung des Zusammenspiels zwischen dem mobilen System, einem zentralen Basisrechner und einem menschlichen Operator. Dabei ist anzumerken, dass natürlich dieser Basisrechner auch teilweise oder vollständig auf einem der mobilen Systeme realisiert sein kann (Software, welche auf der bereits vorhandenen Hardware abläuft). Ebenso können mobile Systeme Missionen ohne jeglichen Eingriff eines Operators Missionen im hochautonomen Zustand ausführen. Dennoch wird davon ausgegangen, dass schon aufgrund der in Kapitel 2.2.3 angeführten moralischen und juristischen Gründe immer ein verantwortlicher Operator vorhanden ist, dessen Eingriffsmöglichkeiten beschrieben und eingeordnet werden müssen.

Das mobile System befindet sich am Einsatzort, kann also direkt Informationen aufnehmen und verarbeiten. Somit ist im Allgemeinen eine schnelle Reaktion möglich. Dafür hat das Fahrzeug zumeist eine weniger leistungsstarke Hardware sowie keinen Zugang zu globalen Informationen. Darunter leidet die Genauigkeit. Unter Zuhilfenahme eines zentralen Rechnersystems lässt sich eine höhere Genauigkeit erzielen. Ein Zentralrechner hat im Allgemeinen eine höhere Rechenkapazität als ein mobiles System und außerdem Zugang zu globalen Informationen. Dafür ist jedoch eine Kommunikation zwischen Zentralrechner und Fahrzeug nötig. Die dabei vergehende Zeit schränkt die Möglichkeit einer schnellen Reaktion ein. Diese Aspekte werden durch Hinzunahme des Menschen noch erweitert: Der Mensch ist mit seinen kognitiven Fähigkeiten einem Computer in vielen Situationen überlegen, allerdings ist er auch deutlich langsamer. Eine höhere Genauigkeit ist damit mit einer längeren Verarbeitungszeit verbunden.

Der beschriebene Ablauf lässt sich als Struktur in einer Kaskadenregelung darstellen. Bei der Kaskadenregelung werden mehrere Regler ineinander verschachtelt. Dabei wird von „inneren“ Reglern eine schnelle Reaktion bei größerer Ungenauigkeit und von den „äußeren“ Reglern eine hohe Genauigkeit bei langsamerer Reaktion gefordert. Dabei werden nun mobiles System, Zentralregler und Operator als Regler sowie die Situation und die durch Kommunikation bzw. Kognition bedingten Totzeiten als Streckenteile angesehen (s. Abbildung 3-3).

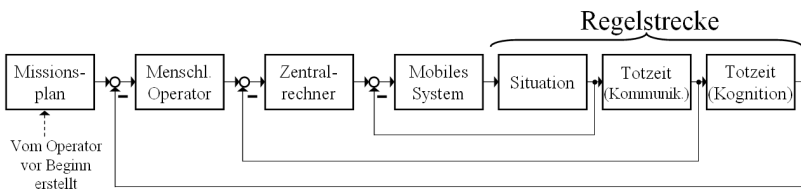


Abbildung 3-3: Aufbau der Steuerung eines mobilen Systems als Kaskadenregelung

Die Einstufung in einen bestimmten Autonomiegrad kann ebenfalls unter regelungstechnischen Gesichtspunkten erfolgen. Dabei wird auch der Tatsache Rechnung getragen, dass ein mobiles System, selbst wenn es vollautonom operiert, trotzdem einem übergeordneten Ziel folgt. Es erfolgt also immer eine Übergabe von Daten aus dem Zentralrechner an das einzelne mobile System, selbst wenn dies nur einmal offline vor Missionsbeginn erfolgt. Dabei kann die Häufigkeit und die Komplexität der übergebenen Daten als Maß für den Autonomiegrad herangezogen werden. In Abbildung 3-4 ist ein höher autonomes mobiles System dargestellt. Vom Zentralrechner erfolgt die Übergabe eines Sollwertes / von Sollwerten. Diese generiert der Zentralrechner aus dem Gesamtmissionsplan. Im mobilen System wirkt ein Regler auf die Aktorik ein. Von der Sensorik werden Messwerte geliefert, welche vom Sollwert zur Bildung der Regeldifferenz subtrahiert werden. Je nachdem, ob die Gesamtstruktur des Systems reaktiv oder kognitiv realisiert werden soll, können verschiede-

dene Regler – von linearen Konzepten bis hin zu wissensbasierten Systemen mit Umweltmodell – zum Einsatz kommen.

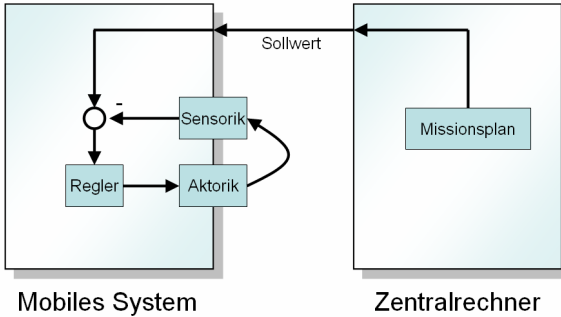


Abbildung 3-4: Höher autonomes mobiles System

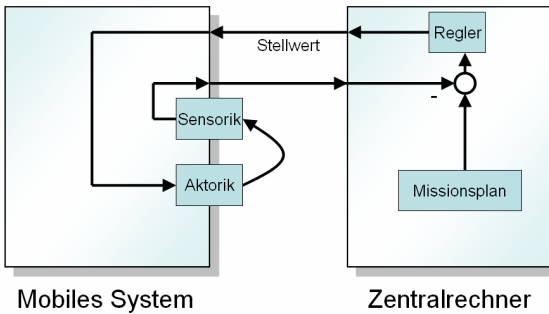


Abbildung 3-5: Nicht autonomes System

Abbildung 3-5 zeigt ein nicht autonomes System (Autonomiegrad ist gleich oder nahezu null). Die Regelung erfolgt auf dem Zentralrechner, und an das mobile System werden direkt die Stellwerte weitergegeben. Das mobile System setzt die Stellwerte ohne Kontrolle auf der Aktorik um. Die Situationserfassung erfolgt über Sensorik. Das mobile System wird in diesem Fall also vollständig gesteuert oder teleoperiert. Bemerkenswert ist, dass Teleoperation

nicht nur vom Menschen, sondern auch von einem Rechner aktiv ausgeführt werden kann. Für das mobile System macht es keinen Unterschied, woher die Kommandos stammen.

Vergleicht man die beiden beispielhaft vorgestellten Systeme, so wird deutlich, dass sich eine Bestimmung des Autonomiegrades auch ohne genaue Kenntnis der inneren Struktur durch Beobachtung der Kommandos realisieren lässt. Im Allgemeinen wird bei weniger autonomen Systemen der Umfang der zu übertragenden Steuerdaten deutlich größer sein. Daraus lässt sich eine interessante Erkenntnis ableiten: Wenn ein System im Bereich der Kommunikation über eine weniger gute technische Ausstattung verfügt, kann es nur hohe Autonomiegrade einnehmen. Nur Systeme mit guten Kommunikationsfähigkeiten können in diesem Fall überhaupt teleoperiert umgesetzt werden, d.h. ihnen steht der gesamte Bereich der Autonomie zur Verfügung. Man hätte eher erwartet, dass ein hohes technisches Niveau Bedingung für höhere autonome Umsetzungen sind. Tatsächlich jedoch kann im Falle von Systemen mit geringerer technischer Ausstattung eine Realisierung mit höherem Autonomiegrad die einzig praktikable Lösung sein. Somit ist die Teleoperierbarkeit (d.h. die Möglichkeit, ein mobiles System im angestrebten Einsatzraum durch einen Menschen oder einen Zentralrechner fernzusteuern) kein prinzipieller Nachteil, sondern eine besondere Fähigkeit, welche in vielen Technologiebereichen des Systems (Kommunikation, Mensch-Maschine-Schnittstelle, Sensorik) Anforderungen stellt. Es wird auch an dieser Stelle wieder deutlich, dass die Zielstellung in der Realisierung nicht ein möglichst hoher Autonomiegrad ist, sondern ein optimal angepasster. Ähnliche Beobachtungen lassen sich auch bei Teams aus mobilen Systemen machen, wie in Kapitel 3.4 und 4.6 weiter ausgeführt wird.

3.3 Entwurf und Realisierung des Adapters

Der in der Konzeptvorstellung beschriebene Adapter muss bei konkreten Umsetzungen durch die Steuerungssoftware realisiert werden. Seine Aufgabe ist es dabei nicht, konkrete Entscheidungen bezüglich des Fahrzeugverhaltens zu treffen, etwa durch das Vorgeben einer Sollgeschwindigkeit oder die Aktivierung eines Nutzlastmoduls. Er ist dafür zuständig, der für die direkte Steuerung des Systems verantwortlichen Software (vergl. Kapitel 4 und 5), Grenzwerte und Einschränkungen vorzugeben sowie deren Entscheidungen gegebenenfalls mit direkt vom Operator ausgehenden Steuerkommandos zu verknüpfen. Somit bieten sich die unterschiedlichsten Umsetzungsmöglichkeiten für den Adapter an. Sie hängen außerdem jeweils vom einzusetzenden Fahrzeug und von der Aufgabenstellung ab. An dieser Stelle soll ein grober Überblick über unterschiedliche Methoden zum Entwurf und zur Realisierung gegeben werden. In den Kapitel 4 und 5 werden dann konkrete Beispiele beschrieben.

Eine erste Klassifizierung des Adapters könnte zwischen wertdiskreten und wertkontinuierlichen Umsetzungen unterscheiden. So kann ein wertkontinuierlicher Adapter auf Basis definierter Algorithmen Grenzwerte für bestimmte Zustandsvariablen eines mobilen Systems berechnen. Dabei würde der Adapter einen Wert für den aktuellen Autonomiegrad berechnen, welchem dann über mathematische Funktionen entsprechende Grenzwerte zugeordnet werden. Beispielsweise ließe sich in einem geringeren Autonomiegrad die Geschwindigkeit einschränken, welche das System maximal erreichen darf. Oder es könnte die Distanz verändert werden, um welche ein System sich von einem definiertem Punkt oder einem vorgegebenen Pfad wegbewegen darf, und somit das Aktionsgebiet eingeschränkt werden. Abbildung 3-6 zeigt ein Beispiel für die mathematische Zuordnung verschiedener Grenzwerte zu bestimmten Autonomiegraden. Dabei wird über einen mathematischen Zusammenhang in Abhängigkeit des aktuellen Autonomielevels ein Faktor bestimmt,

welcher dann mit den global festgesetzten Werten für Geschwindigkeit und Entfernung multipliziert wird, um die neuen gültigen Werte zu bestimmen.

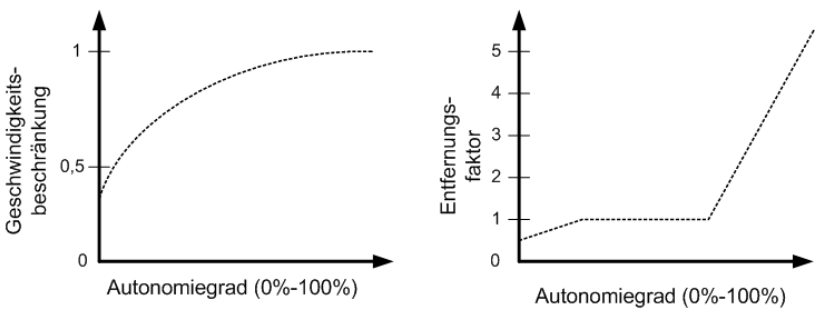


Abbildung 3-6: Mögliche Zuordnungen von Einschränkungsfaktoren zu Autonomiegraden

Tabelle 3-1: Mögliche Definition von diskreten Autonomiegraden

Stufe	Bezeichnung	Bedeutung
0	Teleoperiert	Operator übernimmt vollständig die Steuerung.
1	Teilautonomer Betrieb	Operator gibt neue Zwischenziele vor, diese werden von System selbständig bearbeitet.
2	Hochautonomer Betrieb	System arbeitet vorgegebenen Missionsplan selbständig ab.
3	Hindernisumgehung	System unterbricht die Planausführung, um Hindernis zu umgehen.
4	Kommunikationsverlust	System kehrt in Richtung Basis zurück, bis Kommunikation wieder zustande kommt.

Eine entsprechende wertkontinuierliche Einschränkung wesentlicher Systemparameter wird in vielen Anwendungen nicht notwendig sein. Es kann ausrei-

chen, einige wesentliche diskrete Stufen zu definieren. In jeder Stufe können Systemparameter dann in einen bestimmten Wertebereich beschränkt werden. Darüber hinaus können wesentliche Eigenschaften oder Fähigkeiten des mobilen Systems nur in bestimmten Stufen freigegeben sein. In niedrigen Stufen kann bei direkter Steuerung durch den Operator etwa das Softwaremodul, welches ansonsten für die Bestimmung von Geschwindigkeit und Kurswinkel verantwortlich ist, deaktiviert werden, während in diesem Zustand Nutzlastmodule mit Gefahrenpotential, wie etwa Waffen oder Manipulatoren, für die Nutzung durch den Menschen freigeschaltet sind. Tabelle 3-1 gibt ein Beispiel für eine mögliche Unterteilung, welches keinen Anspruch auf allgemeine Gültigkeit erheben soll und als Beispiel für Systeme mit ständiger Kommunikationsfähigkeit zu einer Basisstation konzipiert ist. Im Allgemeinen wird die jeweilige Einteilung eng an das betreffende Fahrzeug und die konkrete Aufgabenstellung angelehnt sein. In diesem Beispiel arbeitet das Fahrzeug im Autonomielevel 2 einen vorgegebenen Missionsplan selbständig ab. In den Levels 0 und 1 übernimmt der Operator Steuerungsverantwortung, indem er entweder direkt die Steuerkommandos vorgibt oder Zwischenziele für das System generiert (z.B. „Fahre zu einer bestimmten Landmarke“). Der Autonomiegrad 3 wird vom System zur Umgehung von Hindernissen verwendet. Den höchsten Grad nimmt das System bei Verlust der Kommunikation ein. Es ist dann völlig auf sich gestellt und wird versuchen, durch Rückkehr zur Basis den Kontakt wieder herzustellen. Wie bereits im Abschnitt bezüglich der Definition der adaptiven Autonomie beschrieben, ist auch in diesem Szenario der Fall mit dem höchsten Autonomielevel kein gewünschtes Verhalten, sondern tritt nur in der Sondersituation Kommunikationsverlust ein und bleibt aktiv, bis das Problem behoben ist. Ebenfalls zu beachten ist, dass die Level 0 und 1 nicht nur durch Intervention des Operators aktiviert werden können. Ein mobiles System, welches mit der Situation vor Ort überfordert ist, kann gezielt in einen dieser niedrigen Autonomiegrade wechseln, um eine Anfrage an den Operator zu senden mit der Bitte um Unterstützung.

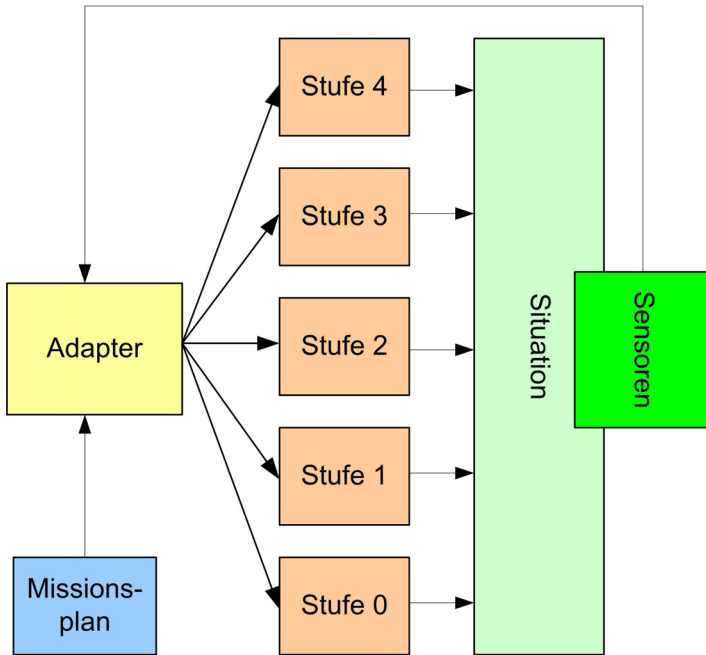


Abbildung 3-7: Beispiel für die Organisation eines Autonomieadapters mit diskreten Ausgängen

Bei wertdiskreten Autonomiegraden besteht die Aufgabe des Adapters also darin, die aktuell gültige Stufe der Autonomie zu bestimmen, wie in Abbildung 3-7 dargestellt. Dies kann wiederum auf unterschiedliche Art und Weise geschehen. Denkbar ist der Einsatz eines Fuzzy-Systems, welches nach gängigen Vorgehensweisen, wie etwa in [KKW96] beschrieben, den aktuellen Autonomiegrad aus verschiedenen Eingangsgrößen bestimmt. In Abbildung 3-8 ist ein Beispiel dargestellt, wobei der Autonomiegrad durch die Qualität der Kommunikationsverbindung, die Entfernung von der Basisstation sowie dem aktuellen Akkustand festgelegt wird. Nach Fuzzyifizierung und Fuzzy-Inferenz (an dieser Stelle nicht dargestellt) kann gemäß der Abbildung die Defuzzyifizierung beispielsweise über die Schwerpunktmethod erfolgen und der diskrete Grad bestimmt werden.

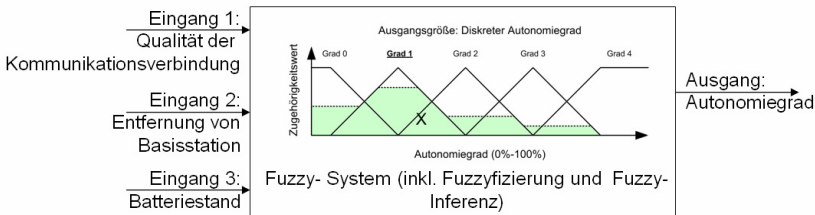


Abbildung 3-8: Realisierung eines Autonomieadapters als Fuzzy-System

Eine andere Möglichkeit besteht darin, den Adapter über einen Zustandsgrafen oder ein Flussdiagramm umzusetzen. Ein sehr ausführliches Beispiel dafür ist in Abbildung 3-9 dargestellt und soll im Folgenden erläutert werden. Dieses Beispiel eignet sich für eine Anwendung, bei welcher folgende Ereignisse berücksichtigt werden sollen:

- Reaktion bei Kommunikationsverlust (Kommunikation wird im Normalfall als gegeben angenommen, was das Beispiel hauptsächlich auf Land- und Luftsysteme beschränkt)
- Hindernisumfahrung
- Reaktion bei internen Fehlern
- Prinzipielle Möglichkeit der Einbindung des Operators; auf dessen eigene Initiative hin oder wenn das mobile System bzw. der Adapter die Notwendigkeit sieht.
- Validierung einer Steuerungsanfrage des Operators, um sicherzustellen, dass...
 - ...die Steuerungsanfrage wirklich vom Operator kommt (besonders wichtig bei militärischen und sicherheitsbezogenen Anwendungen, um die Gefahr zu verhindern, dass die

mobilen Systeme von unbekannter Seite übernommen werden).

- ...der Operator im Rahmen seiner aktuellen physischen Fähigkeiten zur Steuerung des Systems in der Lage ist (Überprüfung auf Müdigkeit, verlangsamte oder ungenaue Reaktionen etc.).

Auf der rechten Seite von Abbildung 3-9 ist die Wahlmöglichkeit für den Autonomiegrad dargestellt. In Erweiterung zu den 5 zuvor vorgestellten Stufen sind in diesem Szenario mehrere, nicht näher bezeichnete Autonomiegrade vorhanden, welche zu Klassen zusammengefasst sind. In der untersten Klasse sind alle Stufen vorhanden, welche ein kontinuierliches Steuern und Überwachen durch den Operator erfordern. Wie bereits ausgeführt, könnten bestimmte Manipulatoren derart eingerichtet sein, dass sie nur in diesen unteren Graden einsetzbar sind. Weitere Grade sind zu den mittleren Autonomiestufen zusammengefasst, in welchen sich das System bei Abarbeitung seines Missionsplans normalerweise bewegen wird. Darüber angeordnet sind drei hohe Autonomiegrade, von denen die oberen zwei bereits für das erste Beispiel beschrieben wurden. Der dritte der hohen Autonomiegrade wird vom System eingenommen, wenn eine Steuerungsanfrage vom Operator empfangen wurde, die Validierung jedoch negativ ausfiel. Dabei entscheidet das System über das weitere Vorgehen, ob also einfach die Anfrage ignoriert und der Missionsplan weiter ausgeführt wird oder ob ein sofortiger Abbruch erfolgt.

Der jeweils aktuelle Autonomiegrad wird von den Operationsknoten mit den Pfeilen gesetzt. Danach kehrt das Programm in die Hauptschleife zurück, welche zyklisch durchlaufen wird. Nach der Ermittlung der aktuellen Zustände wird eine Reihe von Entscheidungsknoten durchlaufen, welche bei von der Norm abweichenden Zuständen zu entsprechenden Änderungen des Autonomiegrades führen. Tritt keine entsprechende Abweichung auf, wird am

Ende der Schleife der Autonomiegrad gemäß der aktuellen Aufgabe gesetzt und so mit der Ausführung des Missionsplans fortgefahren.

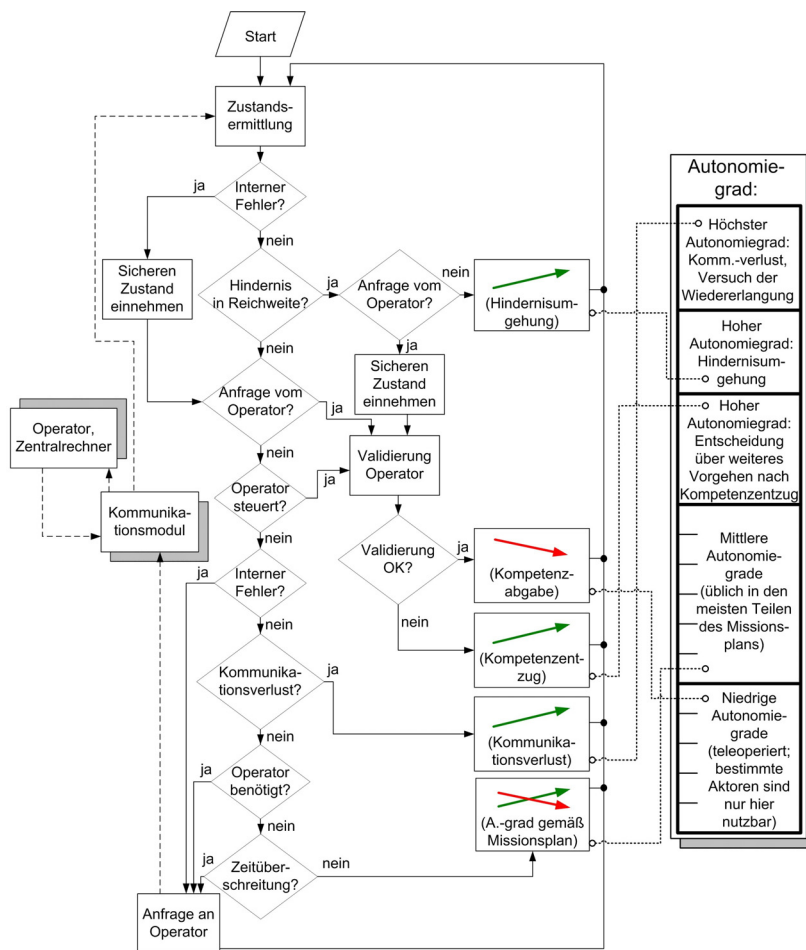


Abbildung 3-9: Komplettes Flussdiagramm einer ereignisdiskreten Steuerung des Autonomiegrades

Ein interner Fehler, die Notwendigkeit eines Operatoreneingriffs sowie eine Zeitüberschreitung in einem bestimmten Zustand, etwa im Rahmen der Abarbeitung eines Missionsplanes, führen zur Absetzung einer Nachricht an den Operator mit Bitte um Eingriff. Beim internen Fehler wird darüber hinaus sofort ein sicherer Zustand eingenommen, um Schaden zu vermeiden. Der Operator kann dann, aber natürlich auch zu jedem anderen Zeitpunkt, eine Anfrage zur direkten Steuerung an das mobile System richten. Wenn eine solche Anfrage eingegangen ist oder wenn der Operator bereits das System steuert, durchläuft das Programm in jedem Schleifendurchlauf eine angepasste Validierung des Operators und gestattet ihm entweder die weiterführende oder erstmalige direkte Steuerung oder entzieht ihm die Kompetenz. Diese Validierung kann auf verschiedene Art und Weise durchgeführt werden, etwa durch Codeabfrage, Verschlüsselung oder dem Senden auf mehreren Frequenzen.

Der höchste Autonomiegrad wird bei Kommunikationsverlust direkt eingenommen. Bei einer bevorstehenden Hindernisumgehung wird zunächst noch überprüft, ob gleichzeitig eine Steuerungsanfrage des Bedieners vorliegt. In diesem Fall wechselt das System zunächst in einen sicheren Zustand (bei Landsystemen: Anhalten), um bei Verzögerungen durch die Validierung oder einer negativen Validierung nicht in eine gefährliche Situation zu kommen.

3.4 Bioorientierte Adaptive Autonomie in Roboterteams

In Kapitel 2.4 wurde unter anderem auf das Problem der Bildung von Fahrzeugverbänden unter dem Aspekt einer möglichst hohen Einzelautonomie hingewiesen. Mithilfe des adaptiven Autonomiekonzeptes lässt sich dieser Widerspruch effektiv lösen. Dies wurde vom Autor in [GW06] am Beispiel

von Unterwasserfahrzeugen vorgestellt, lässt sich aber auf jeden beliebigen Anwendungsfall übertragen.

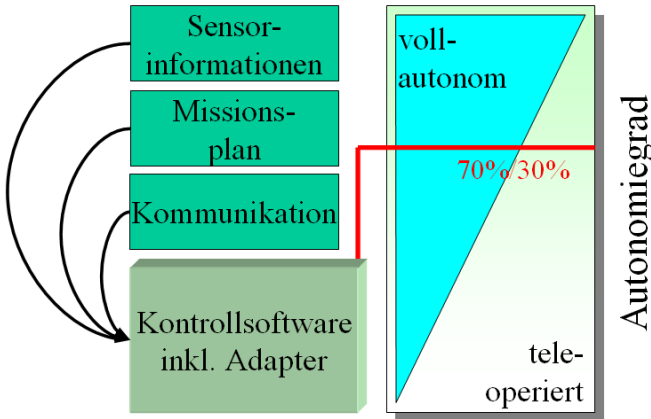


Abbildung 3-10: Autonomiegrad des einzelnen Systems und der Teaminstanz

Wie bereits in diesem Kapitel beschrieben, wird jedem Fahrzeug ein Autonomiegrad zugewiesen, wie es in Abbildung 3-10 dargestellt ist. Der aktuelle Autonomiegrad wird von der Kontrollsoftware bestimmt, welche auf die fahrzeugeigenen Sensoren sowie auf den Missionsplan und – im Verbundeinsatz – auf Kommunikationsdaten anderer Verbundmitglieder zurückgreifen kann. Für einen Fahrzeugverbund wird jetzt der abstrakte Begriff „Verbundinstanz“ oder „Teaminstanz“ eingeführt, welcher ebenfalls einen Autonomiegrad erhält.

Die Verbundinstanz repräsentiert die für die Erlangung der Kooperation nötige Software, welche auf der Hardware eines der Fahrzeuge (Führer) oder auch verteilt auf mehreren ablaufen kann. Im Falle des Ausfalls des Führungssystems kann diese Funktion durch ein anderes System übernommen werden, wofür zuvor eindeutige Regeln festgelegt werden müssen. Für den Autonomiegrad der Verbundinstanz gilt ebenso das Konzept, welches in Abbildung

3-10 dargestellt ist. Der Widerspruch zwischen Einzelautonomie und Kooperation wird jetzt in den Autonomiegraden der Einzelsysteme und der Verbundinstanz ausgedrückt und damit gelöst. Abbildung 3-11 zeigt nochmals das gesamte Autonomiekonzept im Team unter Hinzunahme der Teaminstanz.

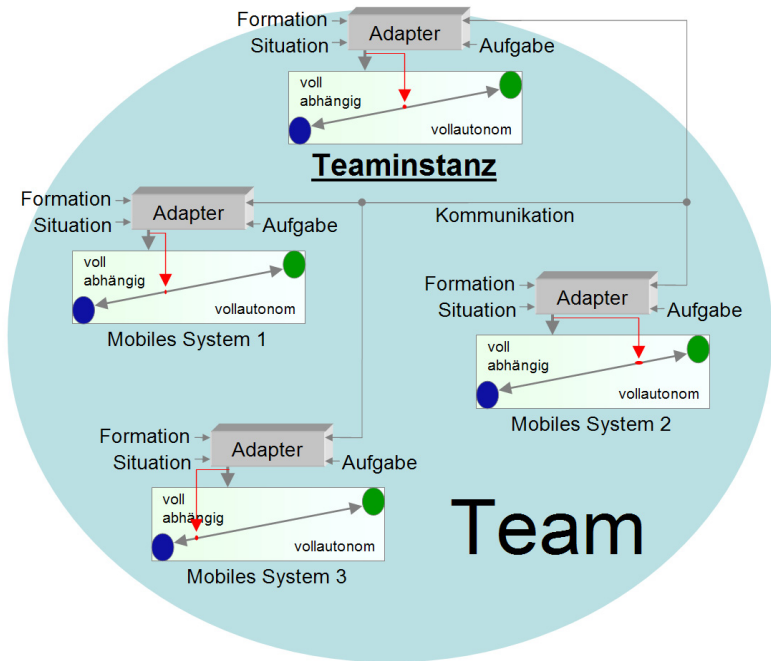


Abbildung 3-11: Autonomiekonzept im Team / Verbund

Die zuvor gemachten Aussagen zu dem Autonomiekonzept bleiben auch im Team erhalten. Abbildung 3-12 zeigt etwa das Fahrzeugteam als Kaskadenregelkreis, wie es zuvor auch für Einzelsysteme beschrieben war.

Ein Merkmal der neu vorgeschlagenen Organisation von Roboterverbänden besteht darin, dass die einzelnen Systeme über möglichst lange Zeit mit hohem Autonomiegrad operieren. Erst wenn gruppenspezifische Eingriffe nötig sind,

wird der Autonomiegrad abgesenkt, um die Änderungen vorzunehmen. Den Herausforderungen der Kommunikation, welche unter Wasser besonders deutlich werden, aber auch an Land bei weiten Distanzen / großen Datenmengen / keiner direkten Sicht / aktiver Störung etc. vorhanden sind, wird damit besonders Rechnung getragen. Im Umkehrschluss bedeutet das auch, dass ein Einzelsystem prinzipiell zum hoch-/vollautonomen Operieren fähig sein muss, ehe es Mitglied in einem entsprechenden Verband werden kann.

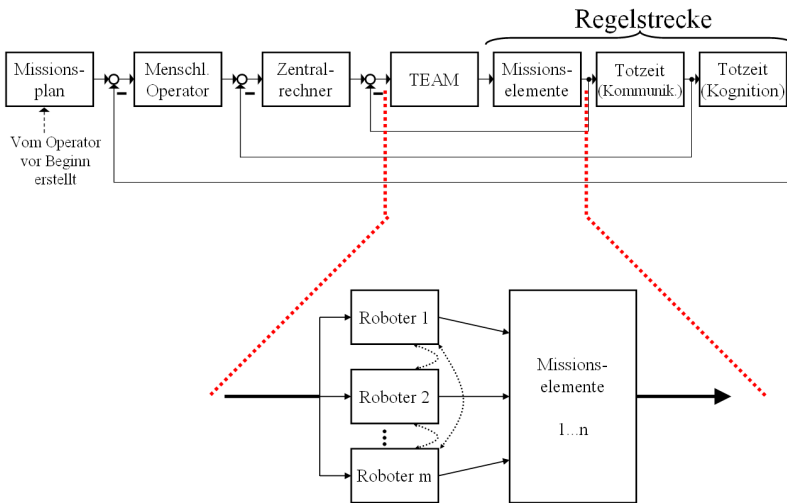


Abbildung 3-12: Fahrzeugteam als Regelkreis

3.5 Zusammenfassende Wertung

In Teams aus unbemannten Fahrzeugen kann das Konzept der adaptiven Autonomie dazu beitragen, den Widerspruch zwischen Autonomie des einzelnen und Kooperation in der Gruppe zu lösen. Dazu wird eine Verbundinstanz neu eingeführt, deren Autonomiegrad eine Art Maß für die Gruppenkooperation ist. Die Autonomiegrade des einzelnen Systems können abgesenkt werden, wodurch der Autonomiegrad des Teams und damit die Kooperation steigt. Dieses Konzept kann gleichzeitig begrenzten Kommunikationsressourcen Rechnung tragen.

In Diskussionen wurde der Widerspruch zwischen Autonomie und Kooperation häufig als „falsches Problem“ abgetan, da auch kooperierende mobile Systeme „autonom“ seien. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass ein Fahrzeug in einem Verbund je nach konkreter Realisierung verschiedene Autonomiegrade einnehmen muss. Im Extremfall kann es vorkommen, dass ein Führungsfahrzeug ein anderes Verbundmitglied vollständig fernsteuert. Für jenes Fahrzeug ist es dann vollkommen unerheblich, ob diese Steuerkommandos von einem menschlichen Bediener oder von einem anderen technischen System stammen. Bei Anwendung eines klassischen, starren Autonomiekonzeptes ist das Einzelfahrzeug nicht mehr autonom, obwohl es nicht von einem menschlichen Bediener gesteuert wird. Die adaptive Autonomie erlaubt es, dieses Fahrzeug auf einer definierten, niedrigen Autonomieebene anzusiedeln, während das steuernde Fahrzeug als hochautonom angesehen wird.

4 Grundsätzliche Teamstrategien

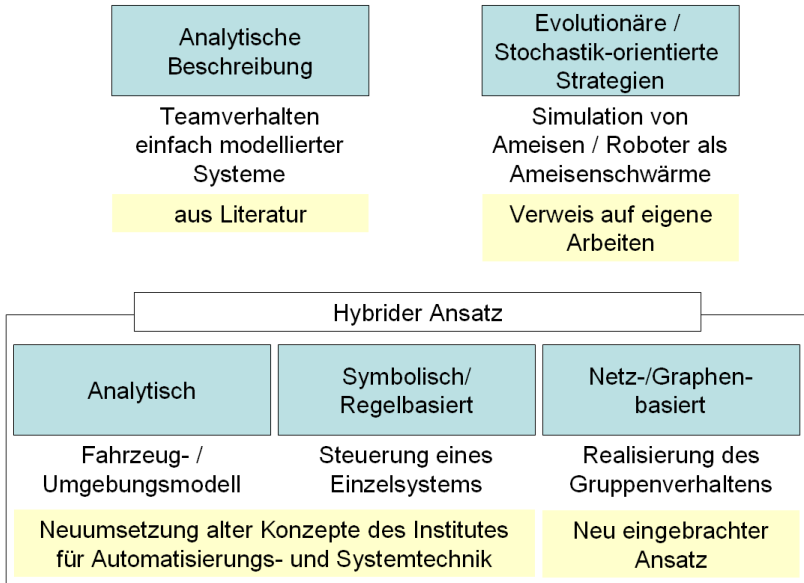


Abbildung 4-1: Übersicht über die in diesem Kapitel vorgestellten Verfahren

Die Ausführungen der vorausgehenden Kapitel sollen im Weiteren durch verschiedene Simulationsbeispiele autonomer Systeme veranschaulicht werden. Im Mittelpunkt wird dabei das Konzept der Bioorientierten Adaptiven Autonomie stehen, so dass eine Beurteilung unterschiedlicher Lösungen anhand von Autonomiegraden erfolgen kann. Eine wesentliche Motivation wird dabei die Umsetzung von Verbänden mobiler Systeme sein. Bei dieser Aufgabe kommt der Widerspruch „Kooperation vs. Selbständigkeit“ besonders stark zum Tragen und kann durch die Benutzung der adaptiven Autonomie wesent-

lich verringert werden. Eine Übersicht über die untersuchten und neu entwickelten Teamstrategien gibt die Abbildung 4-1.

Im Kapitel 4.1 erfolgt die Beschreibung eines hybriden Ansatzes, welcher vom Autor im Rahmen seiner Tätigkeit am Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik der Technischen Universität Ilmenau realisiert wurde. Dieser Ansatz enthält die Neuumsetzung alter Konzepte des Institutes als Übersicht über das für die Simulation komplexerer Systeme verwendete Robotersystem „MauSI 2“ (Modellbildung in Kapitel 4.1.1) und als Steuerung der Modelle im Einzelmodus (Kapitel 4.2) bei der Aufgabe einer Anfahrt vorgegebener Zielkoordinaten in Ebenen mit unbekannten Hindernissen. Als neu eingebrachter Ansatz wird die Erweiterung dieses Konzeptes zur Steuerung und Simulation von Teams aus MauSI-Robotern in vorgegebenen Formationen im Kapitel 4.3 beschrieben. Ebenfalls neu eingebracht wurden verschiedene Simulationen von Schwärmen auf der Basis des Verhaltens von Ameisen. Diese werden aus Platzgründen nicht näher beschrieben, es erfolgen jedoch Zusammenfassung und Literaturhinweise in Kapitel 4.4. Ein aus der Literatur stammender Ansatz mit einem vollständig analytisch umgesetzten Teamverhalten einfacherer Systeme wird in Kapitel 4.5 beschrieben und eingeordnet. Eine Zusammenfassung der unterschiedlichen Verfahren wird in Kapitel 4.6 vorgenommen, ehe in Kapitel 5 Beispiele gezeigt werden.

4.1 Das mobile System „MauSI 2“

Das mobile System „MauSI 2“ (Modell eines autonomen Systems variabler Intelligenz, [AA01]) stellt die erste Generation mobiler Systeme am Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik der Technischen Universität Ilmenau dar. Die Plattformen haben eine Achse mit zwei getrennt ansteuerbaren Moto-

ren. Der Gleichgewichtszustand wird durch eine schleifende Kugel am hinteren Ende des Chassis erreicht. Es handelt sich also um ein nicht-holonomes Fahrzeug nach dem Verfahren des *differential drive*. Das Fahrzeug verfügt über Spezialantriebe mit niedrigem Leistungsverbrauch, welche das System auf eine maximale Geschwindigkeit von etwa 4,5 cm pro Sekunde beschleunigen können. Die Energie wird zwei Standard-Batterien des Typs Mignon (AA) entnommen. Zur weiteren Ausstattung des Systems gehören Infrarot-Sensoren zur Hinderniserkennung, Odometriesensoren zur Messung der Radumdrehungen sowie eine Funkausrüstung aus 433 MHz-LPD-Transceivern mit einer maximal möglichen Datenrate von 9600 Baud und einer maximalen Reichweite zwischen mobilem System und PC von bis zu 10 Metern [Brü02]. Optional ist eine Ausstattung mit einem zweiachsigen Beschleunigungssensor und einer CCD-Kamera. Die Rechnerhardware besteht aus einem 16-bit Mikrocontroller. In Abbildung 4-2 ist ein Schwarm von MauSI 2 – Systemen dargestellt.

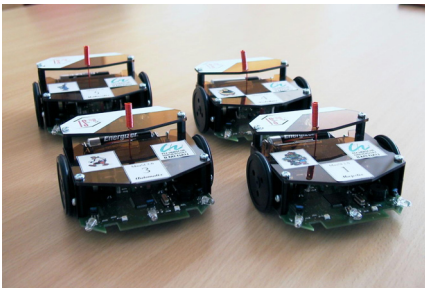


Abbildung 4-2: Mobile Systeme der "MauSI 2"-Klasse

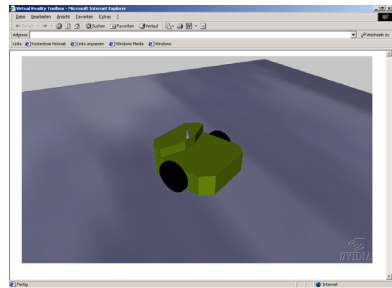


Abbildung 4-3: Simulation eines "MauSI 2"-Systems in virtueller Realität

Neben technischen Realisierungen dienen die „MauSI 2“-Systeme auch als Vorlage für die Simulationen mobiler Systeme in der virtuellen Realität unter Verwendung von MATLAB / Simulink. Eine entsprechende Darstellung eines MauSI 2 – Systems zeigt Abbildung 4-3. Die Simulation erfolgte nach dem internationalen Standard für virtuelle Welten (VRML 2.0). Eine Anbindung

entsprechender virtueller Welten an MATLAB / Simulink ist durch die Verwendung der Virtual Reality Toolbox möglich.

Die Grundlage für eine mögliche Simulation ist eine systemanalytische Modellbildung des mobilen Systems. Diese erfolgte in [Brü02] und wird im Folgenden kurz dargestellt. Dabei ist zwischen dem Bewegungsmodell und dem Sensormodell für die Infrarotsensoren zu unterscheiden. Beide Modellierungen erfolgen zeitdiskret, um eine Simulation unter MATLAB / Simulink zu ermöglichen.

4.1.1 Bewegungsmodell

Das Bewegungsmodell als Grundlage für die Simulation entspricht allgemein der Bewegung eines nicht-holonomen Objektes in einem kartesischen Koordinatensystem [Brü02]. Der aktuelle Zustand des Systems lässt sich daher mit den Lagekoordinaten x und y sowie mit der Ausrichtungsordinate φ hinreichend beschreiben. Die Abtastzeit sei T . Als Index für die Zeit wird die Zählvariable k verwendet, wobei $k \cdot T$ dem aktuellen Zeitpunkt entspricht. Die Spurbreite des nicht-holonomen Systems wird mit b bezeichnet. Für rotatorische Bewegungen des Systems seien definiert die Winkelgeschwindigkeit ω , der Radius r des Bewegungspfades sowie die Bogenlänge l . Die drei letztgenannten Größen sind dabei interne Größen des Bewegungsmodells. Die Eingangsgrößen sind die Zustandsgrößen des Systems zum Zeitpunkt $k-1$ sowie die aktuellen Geschwindigkeiten des linken und rechten Rades zum Zeitpunkt k , entsprechend bezeichnet als v_{lk} und v_{rk} . Schematisch ist das Modell in Abbildung 4-4 dargestellt. Weitere Hinweise können Abbildung 4-5 entnommen werden.

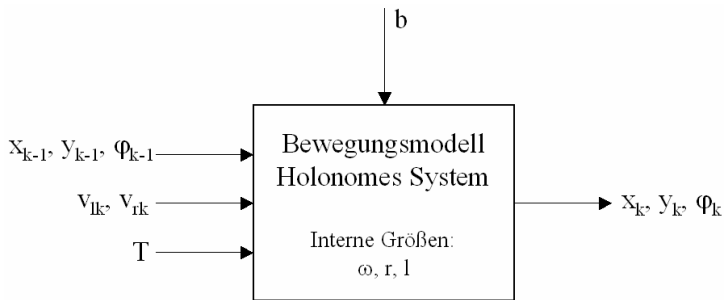


Abbildung 4-4: Das Bewegungsmodell als Black Box

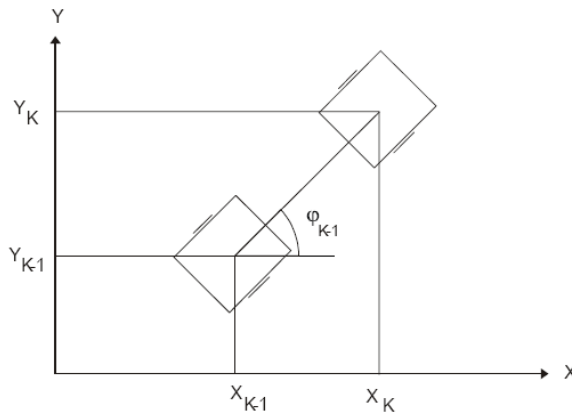


Abbildung 4-5: Translatorische Bewegung eines nicht-holonomen Systems [Brü02]

Bei der mathematischen Betrachtung lässt sich die translatorische von der rotatorischen Bewegung des Systems unterscheiden. Im Falle der translatorischen Bewegung (Abbildung 4-5) sind die Geschwindigkeiten beider Räder gleich groß, es gilt:

$$v_{lk} = v_{rk} = v_k \quad (4-1)$$

Während eines Abtastschrittes wird eine geradlinig gleichförmige Bewegung angenommen. Somit gilt für die Lagekoordinaten:

$$x_k = x_{k-1} + v_{k-1} \cdot T \cdot \cos \varphi_{k-1} \quad (4-2)$$

$$y_k = y_{k-1} + v_{k-1} \cdot T \cdot \sin \varphi_{k-1} \quad (4-3)$$

$$\varphi_k = \varphi_{k-1} \cdot \quad (4-4)$$

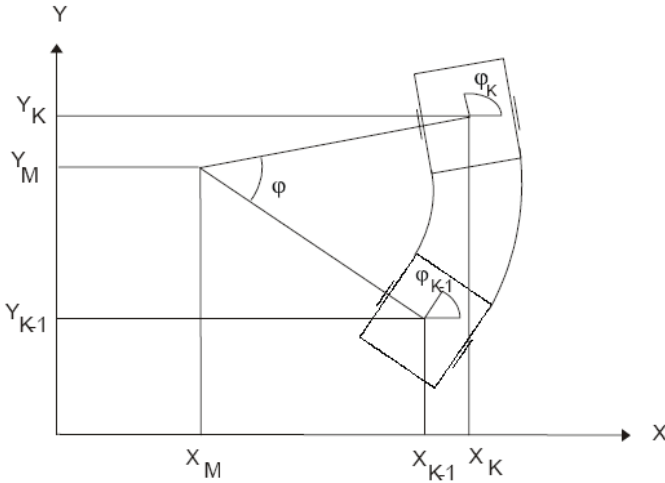


Abbildung 4-6: Rotatorische Bewegung eines nicht-holonomen Systems [Brü02]

Bei unterschiedlichen Radgeschwindigkeiten wird eine rotatorische Bewegung angenommen. Die Geschwindigkeiten werden während eines Tastschrittes als konstant angesehen, daher kann von einer Bewegung auf einer Kreisbahn ausgegangen werden (Abbildung 4-6).

Die Änderung des Lagewinkels φ lässt sich über die Winkelgeschwindigkeit ω und die Abtastzeit T beschreiben zu:

$$\varphi_k = \varphi_{k-1} + \omega_{k-1} \cdot T \cdot \quad (4-5)$$

Die Winkelgeschwindigkeit ω wird als Quotient aus Bahngeschwindigkeit und Bahnradius bestimmt. In diesem Fall sind die beiden Radgeschwindigkeiten v_{rk} und v_{lk} sowie die Spurbreite b bekannt. Mit einer mathematisch positiv ausgerichteten Winkelgeschwindigkeit folgt die Bewegungsgleichung für den Lagewinkel φ :

$$\varphi_k = \varphi_{k-1} + \frac{v_{rk-1} - v_{lk-1}}{b} \cdot T \quad (4-6)$$

Die Beziehungen für x_k und y_k ergeben sich aus dem Zusammenhang des Mittelpunktes, des Fahrkreises und dem Lagewinkel. Eine genaue Herleitung ist in [Brü02] zu finden. Es gilt:

$$x_k = x_{k-1} + \frac{b}{2} \cdot \frac{v_{rk-1} + v_{lk-1}}{v_{rk-1} - v_{lk-1}} \cdot \left[\sin\left(\varphi_{k-1} + \frac{v_{rk-1} - v_{lk-1}}{b} \cdot T\right) - \sin(\varphi_{k-1}) \right] \quad \text{und} \quad (4-7)$$

$$y_k = y_{k-1} + \frac{b}{2} \cdot \frac{v_{rk-1} + v_{lk-1}}{v_{rk-1} - v_{lk-1}} \cdot \left[\cos(\varphi_{k-1}) - \cos\left(\varphi_{k-1} - \frac{v_{rk-1} - v_{lk-1}}{b} \cdot T\right) \right] \quad (4-8)$$

4.1.2 Sensormodell

Zur realistischen Simulation der Fahrt mobiler Systeme in unbekannten Welten muss ein Sensormodell entwickelt werden, welches an die realen Sensoren angelehnt ist. In [Brü02] wird ein einzelner Sensor als Gerade angenähert, wie in Abbildung 4-7 dargestellt. Das Sensormodell wird in [FRU03] erweitert, so dass der Streubereich um einen bestimmten Winkel berücksichtigt werden kann. Aufgabe des Modells ist es, für jeden vorhandenen Sensor den Abstand des nächsten Hindernisses im Streubereich zu bestimmen. Sind mehrere Hindernisse vorhanden, wird nur die Distanz des nächsten ermittelt. Die Reichweite ist dabei auf einen bestimmten Wert begrenzt. Wird innerhalb dieser Distanz kein Hindernis detektiert, wird als Wert der Entfernung unendlich gesetzt. Die Vorgehensweise entspricht einer eindimensionalen Nachbildung der realen Sensoren. Dabei ist es unerheblich, ob in der Realität Infrarot-,

Ultraschall-, Laser-, Radar- oder andere Sensoren verwendet werden. Bei der Auswahl eines Sensortyps in der Realität müssen die Umgebungsparameter berücksichtigt werden. Dabei kann es notwendig und sinnvoll sein, eine Datenvorverarbeitung vorzunehmen. Erfahrungen mit dem realen MauSI-System zeigten zum Beispiel die Schwierigkeiten auf, eine Kombination aus Infrarotsensor und Infrarot-LED zu verwenden. Der Versuchsaufbau befand sich direkt neben einer großen Fensterfront. Dabei überstieg der Infrarotanteil des natürlichen Lichtes die Emissionen der LED. Ließ man das MauSI-System in der Einsatzarena ohne Hindernisse auf der Stelle rotieren, so störten die Werte des Infrarotsensors im gesamten Messbereich. Abhilfe kann eine Differenzialmessung schaffen, bei welcher die Infrarot-LED ständig ein- und ausgeschaltet wird. Durch Differenzbildung der Sensorwerte bei ein- und bei ausgeschalteter LED lässt sich der Einfluss des natürlichen Lichtes eliminieren.

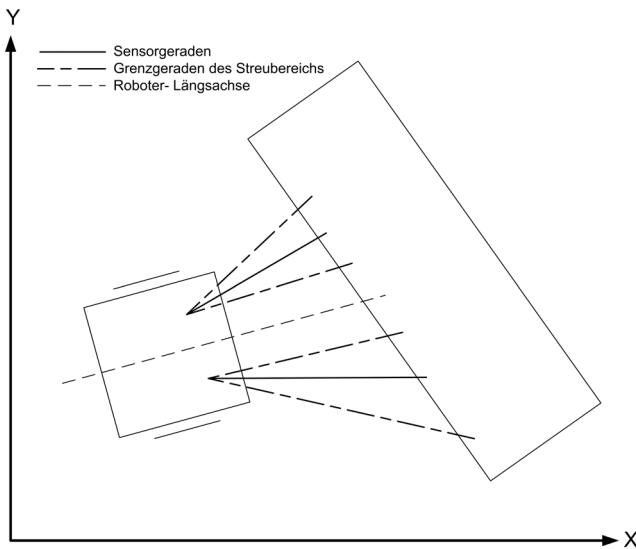


Abbildung 4-7: Struktur des Sensormodells

Bei der Realisierung in der Simulation wurde die Verwendung einer entsprechenden Vorverarbeitung, wenn nötig, vorausgesetzt. Das Problem der Simulation von geradenapproximierten Abstandssensoren lässt sich dann als die Distanzberechnung der Sensorkoordinaten und der Schnittpunkte der Sensorgeraden mit den Kanten der Hindernisse lösen. Für die Herleitung wird auf die aktuellen Koordinaten des MauSI-Systems x_k, y_k und φ_k nach Kapitel 4.1.1 zurückgegriffen. Es seien n Sensoren vorhanden. Ihre Positionen und Ausrichtungen seien im Koordinatensystem M relativ zum MauSI-System beschrieben mit:

$$x_i^M, y_i^M, \varphi_i^M; i = 1, 2, \dots, n. \quad (4-9)$$

Das Koordinatensystem M hat seinen Ursprung im Mittelpunkt des MauSI-Systems. Die Ordinate zeigt in Richtung Front des Systems. Die Koordinaten der Sensoren im Globalkoordinatensystem lassen sich dann durch Rotation um den Winkel φ_k und die Verschiebung um (x_k, y_k) bestimmen. Der Winkel φ_i im Globalkoordinatensystem erhält man als Addition aus dem Lagewinkel des MauSI-Systems und dem Ausrichtungswinkel des jeweiligen Sensors zu:

$$x_i = x_k + x_i^M \cdot \cos \varphi_k - y_i^M \cdot \sin \varphi_k \quad (4-10)$$

$$y_i = y_k + y_i^M \cdot \cos \varphi_k + x_i^M \cdot \sin \varphi_k \quad (4-11)$$

$$\varphi_i = \varphi_i^M + \varphi_k. \quad (4-12)$$

Von jedem Sensor sind also Koordinaten und Ausrichtung im Globalkoordinatensystem bestimmbar. Damit ist die Geradengleichung des Sensorstrahls bzw. der Sensorgerade eindeutig festgelegt, da sich eine Geradengleichung in einer x,y-Ebene durch einen Punkt und den Winkel aufstellen lässt zu:

$$y - y_i = m \cdot (x - x_i) \quad \text{mit} \quad m = \tan \varphi_i \quad (4-13)$$

$$\Rightarrow y - \tan \varphi_i \cdot x + x_i \cdot \tan \varphi_i - y_i = 0 \quad .$$

Zu bestimmen sind nun die Schnittpunkte der Sensorgeraden mit den Hinderniskanten. Dies wird im Folgenden am Beispiel rechteckiger Hindernisse ge-

zeigt. Die Positionen der Hindernisse sind in der Simulation bekannt. Bei jedem rechteckigen Hindernis gibt es vier Hinderniskanten, die sich jeweils als Gerade durch je zwei Eckpunkte beschreiben lassen. Benennt man je zwei Eckkoordinaten mit (x_a, y_a) und (x_b, y_b) , so erhält man als Geradengleichung, beschrieben durch zwei Punkte in der x,y-Ebene, die Beziehung:

$$\frac{x - x_a}{x_b - x_a} = \frac{y - y_a}{y_b - y_a} \quad (4-14)$$

$$\Rightarrow (y_b - y_a) \cdot x - (x_b - x_a) \cdot y + y_a \cdot x_b - x_a \cdot y_b = 0 \cdot$$

Die allgemeine Geradengleichung in der x,y-Ebene lautet:

$$a \cdot x + b \cdot y + c = 0 \cdot \quad (4-15)$$

Durch Gleichsetzung von (4-13) und (4-15) sowie (4-14) und (4-15) ergeben sich die folgenden Beziehungen:

$$y - \tan \varphi_i \cdot x + x_i \cdot \tan \varphi_i - y_i = a_1 \cdot x + b_1 \cdot y + c_1 \quad (4-16)$$

$$\Rightarrow a_1 = -\tan \varphi_i; \quad b_1 = 1; \quad c_1 = x_i \cdot \tan \varphi_i - y_i$$

$$(y_b - y_a) \cdot x - (x_b - x_a) \cdot y + y_a \cdot x_b - x_a \cdot y_b = a_2 \cdot x + b_2 \cdot y + c_2 \quad (4-17)$$

$$\Rightarrow a_2 = y_b - y_a; \quad b_2 = x_b - x_a; \quad c_2 = y_a \cdot x_b - x_a \cdot y_b \quad \cdot$$

Den Schnittpunkt (x_s, y_s) von Sensorgerade und Hinderniskante erhält man durch Lösen des Gleichungssystems mit den Gleichungen (4-14) und (4-17). Das Resultat ist:

$$x_s = \frac{b_1 \cdot c_2 - b_2 \cdot c_1}{a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1}; \quad y_s = \frac{a_2 \cdot c_1 - a_1 \cdot c_2}{a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1} \quad (4-18)$$

Der vom Sensor ermittelte Wert berechnet sich aus dem Abstand der Sensor-koordinate und der Schnittstelle zu:

$$s_{i,ab} = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} \quad (4-19)$$

Auf diese Weise lassen sich die Abstände zu allen Hinderniskanten für jeden Sensor bestimmen. Zu überprüfen ist jeweils noch, ob die Hinderniskante sich vor oder hinter dem Sensor befindet. Zur Rechenzeitoptimierung empfiehlt es sich, generell nur die Hindernisse zu berücksichtigen, welche sich vor dem Sensor befinden. Auch die dem Roboter abgewandten Kanten können bestimmt und ausgelassen werden. Der Sensorwert bestimmt sich zu:

$$s_i = \begin{cases} \min(s_{i,ab}) & \text{für } \min(s_{i,ab}) \leq s_{\max} \\ \infty & \text{sonst} \end{cases} \tag{4-20}$$

mit $s_{i,ab}$: alle für Sensor i relevanten Kanten

s_{\max} : maximaler Messwert des Sensors.

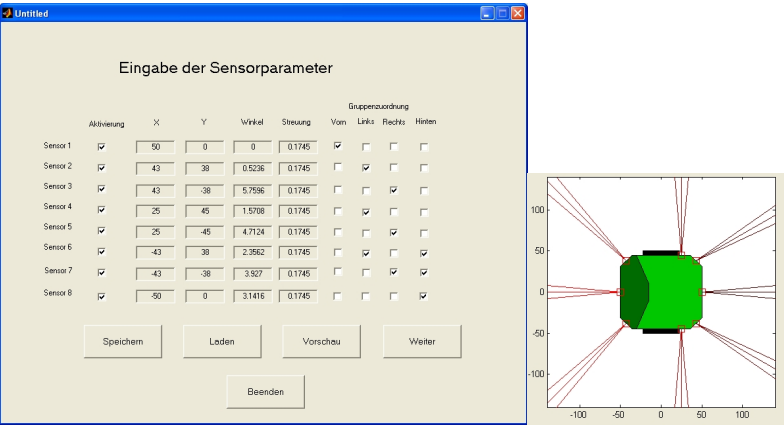


Abbildung 4-8: Bedienoberfläche des erweiterten Sensormodells

Das beschriebene Konzept kann nach [Fru03] erweitert werden, um auch die Sensorstrahlung δ_i zu berücksichtigen. Dabei wird für jeden Sensor nicht nur die Gerade durch $x_{i2}y_i$ mit dem Winkel φ_i zur Berechnung verwendet, sondern auch noch die Geraden mit dem Winkel $(\varphi_i + \delta_i)$ und $(\varphi_i - \delta_i)$. Diese gehen mit dem halben Gewicht als der Mittelstrahl in die Berechnung ein. Berücksichtigt

werden muss, dass dies den Rechenaufwand verdreifacht. Für große δ_i ist es außerdem sinnvoll, weitere Geraden mit Zwischenwinkeln aufzustellen, um das Nichtbeachten eines mit einer Ecke in den Sensorbereich hineinragenden Hindernisses zu beachten. Bei Verwendung von ausschließlich polygonen Hindernissen, welche nicht wesentlich geringer sind als die Roboter selbst, und Streuungswinkeln δ_i in einem kleinen Bereich (bis etwa 45°) kann auf weitere Zwischenrechnungen verzichtet werden. Allgemein ist ein Kompromiss zwischen Fehlertoleranz und Rechenaufwand zu finden.

In Abbildung 4-8 ist die Oberfläche zum Editieren der Sensorinformationen nach [Fru03] dargestellt. Bis zu acht Sensoren können aktiviert werden. Es sind jeweils die Sensordaten $x_i^M, y_i^M, \varphi_i^M, \delta_i$ einzugeben. Außerdem wird jeder Sensor einer oder mehrerer der Gruppen „vorne“, „links“, „rechts“ oder „hinten“ zugeordnet. Für jede dieser Gruppen wird dann der jeweils niedrigste Wert zurückgeliefert. In dem Beispiel nach Abbildung 4-8 also würde etwa für die Gruppe „Rechts“ der niedrigste Messwert der Sensoren 3, 5 und 7 verwendet. Ebenfalls in der Abbildung dargestellt ist eine Vorschau für eine Auslegung mit acht Sensoren. Die Einteilung der Sensoren in die vier Gruppen ist Grundlage der Steuerungssoftware und erlaubt eine einfache Adaption von verschiedenen Sensorkonfigurationen.

4.2 Autonomes Fahren eines „MauSI 2“-Systems

In [Brü02] wird als Grundlage der Steuerung die Forderung nach einem robusten und flexiblen Steuerungskonzept aufgestellt. Da die Einsatzarena nicht bekannt ist, können Trajektorienplanungen oder landmarkengestützte Navigationsverfahren nicht zum Einsatz kommen. Das Problem der Positionsbe-

stimmung der mobilen Systeme wird in der Simulation nicht weiter vertieft. In [Wet03] wird die Eignung eines Beschleunigungssensors zur internen Navigation für das reale System MauSI 2 auf kurzen Teilstücken aufgezeigt. Die größten Abweichungen treten bei Drehungen auf der Stelle auf, wofür die Verwendung eines Gyroskops vorgeschlagen wird. Wie bereits im Kapitel 2.2.1 beschrieben wurde, lassen sich durch Kombination von interner und globaler Sensorik die genauesten Ergebnisse erzielen.

4.2.1 Prinzipielle Realisierung

Die Steuerung in [Brü02] basiert auf der Verwendung eines sensorbasierten Fuzzy-Konzeptes zur Erlangung von Transparenz, Robustheit und Wartbarkeit. Eine Zerlegung in einzelne Teilprobleme wird durch einen hierarchischen Aufbau erreicht. Dabei wird prinzipiell zwischen Zielfahrt in einer hindernisfreien Umwelt und Hindernisvermeidung unterschieden. Es kommen zwei hierarchisch angeordnete Fuzzy-Systeme zum Einsatz. (s. [SKW95], [KW96]), welche beide auf dem Roboter installiert werden können. Steht eine Kommunikationsverbindung mit ausreichend geringer Latenzzeit zur Verfügung, können die Fuzzy-Systeme auch auf einem Zentralrechner laufen (s. entsprechenden Vergleich in Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5). Das für die Zielfahrt verantwortliche Fuzzy-System bestimmt die Solldrehzahlen für den linken und den rechten Motor des Systems mit der Aufgabe, ein vorgegebenes Ziel zu erreichen. Das Fuzzy-System zur Zielfahrt hat die Aufgabe, das dem anderen Fuzzy-System als Eingang vorgegebene Ziel zu verlegen, wenn ein Hindernis in Zielrichtung detektiert wird. Dieses zweite Fuzzy-System kreiert sozusagen ein virtuelles Ziel und verlegt dieses so, dass ein Hindernis umfahren werden kann. Das Prinzip ist in Abbildung 4-9 dargestellt. Der mobile Roboter dreht vor dem Ziel ab und bewegt sich in Richtung des virtuellen Zieles. Dies kann er jedoch nie erreichen, da das Fuzzy-System zur Hindernisvermeidung nur den Zielwinkel verändert. Das bedeutet, der Roboter ist vom

virtuellen Ziel immer so weit entfernt, wie er auch vom realen Ziel entfernt ist; das virtuelle Ziel wird dabei weiter weg verlegt, wenn der Roboter sich ihm nähert. Wenn der Roboter in Abbildung 4-9 am oberen Ende des Hindernisses angekommen ist und die Sensoren kein Hindernis in Zielrichtung mehr detektieren können, wird das virtuelle Ziel wieder in das reale Ziel überführt. Dies kann schrittweise erfolgen, um ein sanftes Drehen des Roboters zu erreichen. Dann würde ein drittes Fuzzy-System zur verzögerten Zielrückführung zum Einsatz kommen. Darauf wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

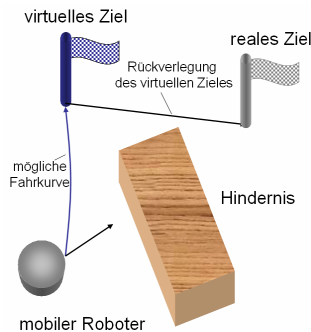


Abbildung 4-9: Das Prinzip des virtuellen Zieles [AGW02]

Die beschriebene Vorgehensweise erlaubt einen modularen Aufbau, wie er in Abbildung 4-10 dargestellt ist. Das Bild des Roboters steht für das analytische Modell, wie es in Kapitel 4.1 beschrieben wurde. Aus den Soll-drehzahlen der Räder berechnet das Modell die aktuelle Position und Ausrichtung des Systems. Der Übergang der Soll-drehzahlen auf das Modell wird dabei mit einer Zeitkonstante T_l verzögert, um das reale, nicht unendlich schnelle Stellverhalten der Motoren nachzubilden. Die berechneten Positions- und Lagewerte werden wie bereits ausgeführt unverrauscht übernommen. Aus dem Missionsplan des Roboters wird das aktuell anzufahrende Ziel übernommen und daraus sowie aus der Roboterposition Winkel und Distanz zum Ziel berechnet. Diese

Informationen werden ebenso wie die aus dem Sensormodell stammenden Daten der Infrarotsensoren dem übergeordneten Fuzzy-System zur Hindernisvermeidung übergeben. Dieses Fuzzy-System wird nur dann aktiv, wenn ein Hindernis in Zielrichtung erkannt wird. Ansonsten liefert es die erhaltenen Daten unverändert an das untergeordnete Fuzzy-System zur Zielsuche weiter. Dieses wiederum bestimmt die notwendigen Drehzahlen für die Motoren, um das Ziel anzusteuern. Wenn das übergeordnete Fuzzy-System ein Hindernis in Zielrichtung detektiert, wird ein virtuelles Ziel kreiert, indem der reale Zielwinkel verschoben wird. Die Distanz wird nicht verändert. Der neue Zielwinkel wird dem untergeordneten Fuzzy-System übergeben, welches daraufhin die Bahn des Roboters in Richtung des virtuellen Zieles und somit weg vom Hindernis führt. Erkennen die Sensoren kein Hindernis mehr in Zielrichtung, wird die Verschiebung des Zielwinkels rückgängig gemacht; der Roboter nimmt somit wieder Fahrt in Richtung des realen Zieles auf.

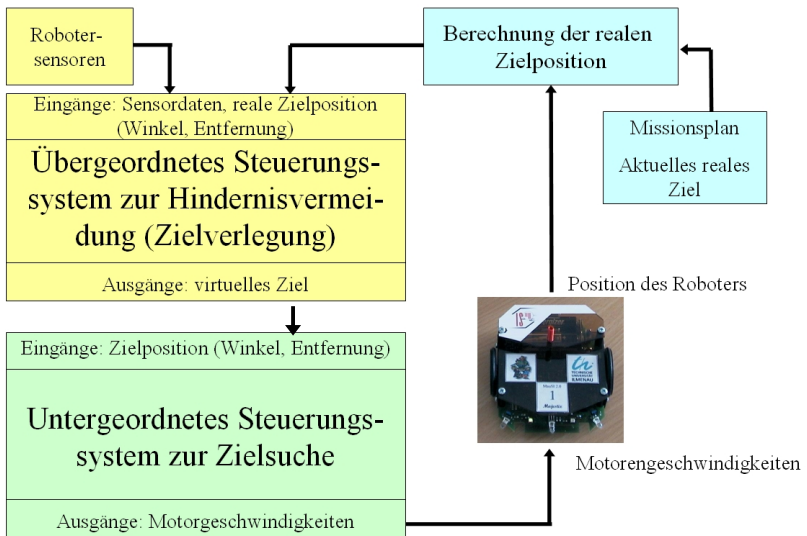


Abbildung 4-10: Schematische Darstellung des Steuerungskonzeptes

In dieser Darstellung wird das in Kapitel 3 vorgeschlagene Konzept der adaptiven Autonomie deutlich. Im Zustand Zielfahrt ohne Hindernis bewegt sich der Roboter auf die vom Missionsplan (höhere Instanz) vorgegebenen Zielpunkte zu. Die Autonomie des Roboters wird selbständig erhöht, wenn ein Hindernis erkannt und das übergeordnete Fuzzy-System aktiv wird. Der Roboter übernimmt dann in Eigenverantwortung die Umfahrung und legt dabei einen nicht vorgeplanten Weg zurück.

Abbildung 4-11 zeigt nochmals die Ein- und Ausgänge der beiden verwendeten Fuzzy-Systeme. Das Fuzzy-System zur Zielfahrt erhält als Eingang Winkel und Distanz zum Ziel, ohne weitere Informationen darüber zu bekommen, ob es sich bei den Werten um das reale oder das virtuelle Ziel handelt. Optional ist ein weiterer Eingang vorgesehen, mit dem eine gewünschte Orientierung im Ziel vorgegeben werden kann. Ausgangsgrößen sind wie beschrieben die Soll-drehzahlen der beiden Motoren.

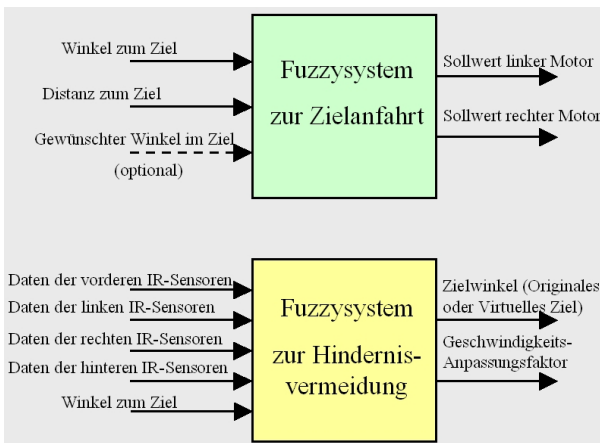


Abbildung 4-11: Ein- und Ausgänge der verwendeten Fuzzysysteme

Das Fuzzy-System zur Hindernisvermeidung erhält die vier Distanzwerte der Sensorengruppen gemäß den Ausführungen in Kapitel 4.1.2. Die Zweckmäßigkeit der Bündelung aller Sensordaten in vier Gruppen wird dabei deutlich: Jede beliebige Sensorkonfiguration am Robotersystem kann ohne elementare Änderungen am Steuersystem übernommen werden, indem jeder neu hinzugefügte Sensor in eine oder mehrere Gruppen eingeordnet wird. Als weiterer Eingang steht der Winkel zum Ziel zur Verfügung. Dadurch kann gewährleistet werden, dass das Fuzzy-System nur dann aktiv wird, wenn ein Hindernis in direkter Zielrichtung und somit in der Bahn des Roboters liegt. Das Fuzzy-System liefert als Ausgangsgrößen den Zielwinkel sowie einen Geschwindigkeitsanpassungsfaktor. Dieser ermöglicht es, das Robotersystem bei der Annäherung an ein Hindernis langsamer fahren zu lassen.

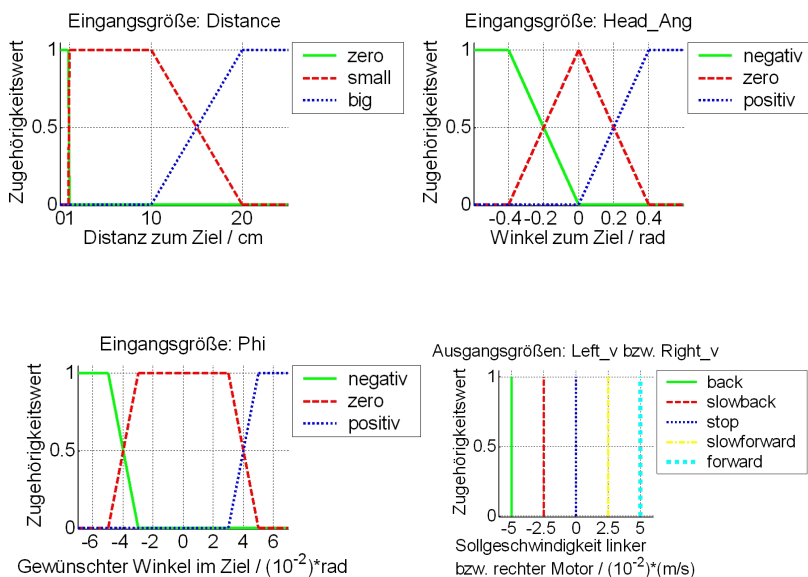


Abbildung 4-12 a-d: Zugehörigkeitsfunktionen der Ein- und Ausgänge des Fuzzy-Systems zur Zielfahrt

Die Realisierung der Fuzzy-Systeme unter MATLAB / Simulink erfolgte mit der an der Technischen Universität Ilmenau entwickelten FCD – Toolbox (Fuzzy Control Design Toolbox, s. [TSF3]). Im Folgenden werden die Fuzzy-Systeme beschrieben. Abbildung 4-12 zeigt die Zugehörigkeitsfunktionen des Fuzzy-System zur Zielfahrt. Die Definition der Zugehörigkeitsfunktionen erfolgt klassisch unter Verwendung von Trapezen und Dreiecken. Auffallend ist der relativ scharfe Übergang der Zugehörigkeitsfunktionen „zero“ und „small“ bei der linguistischen Variable Distance, der bei der Optimierung entsprechend gefunden wurde.

Tabelle 4-1: Regelwerk des Fuzzy-Systems zur Zielfahrt

Nr.	IF	AND	THEN
01	Distance = big	Head_Ang = positiv	Left_v := back
02	Distance = big	Head_Ang = positiv	Right_v := forward
03	Distance = big	Head_Ang = negativ	Left_v := forward
04	Distance = big	Head_Ang = negativ	Right_v := back
05	Distance = big	Head_Ang = zero	Left_v := forward
06	Distance = big	Head_Ang = zero	Right_v := forward
07	Distance = small	Head_Ang = positiv	Left_v := slowback
08	Distance = small	Head_Ang = positiv	Right_v := slowforward
09	Distance = small	Head_Ang = negativ	Left_v := slowforward
10	Distance = small	Head_Ang = negativ	Right_v := slowback
11	Distance = small	Head_Ang = zero	Left_v := slowforward
12	Distance = small	Head_Ang = zero	Right_v := slowforward
13	Distance = zero	-	Left_v := stop
14	Distance = zero	-	Right_v := stop

Im Regeleditor der FCD-Toolbox wurden für das Fuzzy-System zur Zielfahrt im einfachen Fall (ohne Vorgabe einer Sollausrichtung im Ziel) das Regelwerk nach Tabelle 4-1 umgesetzt. Die ersten vier Regeln lassen dabei den Roboter auf der Stelle drehen, bis er direkt zum Ziel hin ausgerichtet ist. Danach lassen ihn im Wesentlichen die Regeln fünf und sechs geradeaus auf das Ziel zufahren. Entsprechend verhalten sich die Regeln sieben bis zwölf, welche im Falle einer geringeren Zieldistanz zum Einsatz kommen und den Roboter mit einer geringeren Geschwindigkeit operieren lassen. Die Regeln 13 und 14 stoppen den Roboter, wenn er das Ziel erreicht hat.

Tabelle 4-2: Ergänzung des Regelwerkes für das Fuzzy-System zur Zielfahrt

Nr.	IF	AND	THEN
13	Distance = zero	Phi = positiv	Left_v := slowback
14	Distance = zero	Phi = positiv	Right_v := slowforward
15	Distance = zero	Phi = negativ	Left_v := slowforward
16	Distance = zero	Phi = negativ	Right_v := slowback
17	Distance = zero	Phi = zero	Left_v := stop
18	Distance = zero	Phi = zero	Right_v := stop

Wenn eine bestimmte Ausrichtung im Ziel gewünscht wird, so sind die Regeln 13 und 14 aus Tabelle 4-1 zu streichen und das Regelwerk mit den Regeln aus Tabelle 4-2 zu ergänzen. Dabei wird der Roboter nach Erreichen des Zieles so lange auf der Stelle gedreht, bis der vorgegebene Winkel erreicht wird. Danach wird er gestoppt. Mit diesem vorgestellten Fuzzy-System wurden in Tests Genauigkeiten von ± 1 Zentimeter für die Zielgenauigkeit in beiden Achsen und $\pm 2^\circ$ für die gewünschte Ausrichtung im Ziel erreicht (Angaben für einmaliges Anfahren eines Zielpunktes auf einer Fläche von 1,5 mal 1,5 Metern).

Vom Fuzzy-System zur Hindernisvermeidung sind in Abbildung 4-13 a-c die Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangswerte und in Abbildung 4-14 a und b die Zugehörigkeitsfunktionen der Ausgangswerte dargestellt. Für die linguisti-

sche Variablen $L(ef)$ und $R(ight)$ wird im Gegensatz zu $F(ront)$ und $B(ack)$ eine zusätzliche Zugehörigkeitsfunktion „medium“ verwendet, welche jedoch erst bei der weiteren Regelverbesserung in Kapitel 4.2.2 zur Anwendung kommen wird.

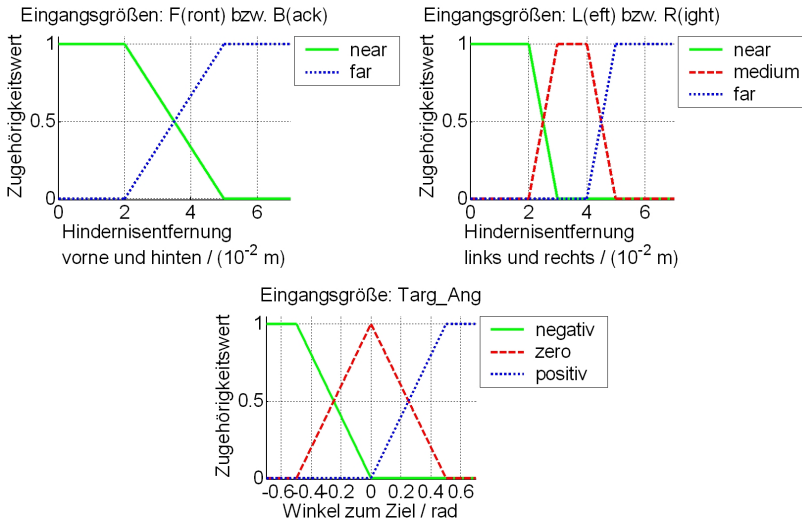


Abbildung 4-13 a-c: Zugehörigkeitsfunktionen der Eingänge des Fuzzy-Systems zur Hindernisvermeidung

Tabelle 4-3 zeigt eine Umsetzung eines Regelwerkes zur Hindernisvermeidung. Regel 1 ist trivial: Wenn kein Hindernis erkannt wird, wird das Ziel nicht verschoben. Ist eine Seite hindernisfrei, so wird das Ziel nach Regel 2 und 3 dorthin verschoben, wenn auf der anderen Seite und im Frontalbereich ein Hindernis detektiert wird. Ohne entsprechende Sensormeldung der Frontpartie wird das Ziel nur leicht seitlich verlegt (Regel 5 und 6), da zwar ein Hindernis vorhanden ist, aber nicht in Fahrt- und Zielrichtung des Roboters liegt. Ebenfalls von Bedeutung sind diese Regeln, wenn der Roboter entlang eines Hin-

dernisses fährt. Regel 4 bewirkt ein Abdrehen vor einem Hindernis, wenn im Frontalbereich ein Hindernis detektiert wird, nicht aber an den Seiten. Es wird zunächst willkürlich ein Abdrehen nach rechts eingestellt. Die weiteren Regeln passen die Geschwindigkeit des Systems an die jeweilige Situation an. Wenn kein Hindernis feststellbar ist, bleibt der Geschwindigkeitsmultiplikator auf normal (=1), (Regel 7). Wird im Front-, Links- oder Rechtsbereich ein Hindernis festgestellt, wird die Geschwindigkeit reduziert (Regeln 9 bis 11). Ein Hindernis im Rückbereich führt nach Regel 8 zur Erhöhung der Geschwindigkeit über das normale Maß hinaus, um sich von einem Hindernis schnell zu entfernen. Dies ist besonders dann sinnvoll, wenn sich im Einsatzgebiet mehrere mobile Systeme aufhalten, da auch einem möglichen weiteren System durch erhöhte Geschwindigkeit ausgewichen werden kann. Der Ausgang V_Mult des übergeordneten Fuzzy-Systems wird in der Simulation auch als Indikator für die Anwesenheit von Hindernissen verwendet. Für $V_Mult \geq 1$ ist kein kritisches Hindernis vorhanden; es wird der direkte Zielwinkel an das unterlagerte Fuzzy-System übergeben. Im anderen Fall wird der Wert D_Phi übergeben, und damit ein virtuelles Ziel erzeugt.

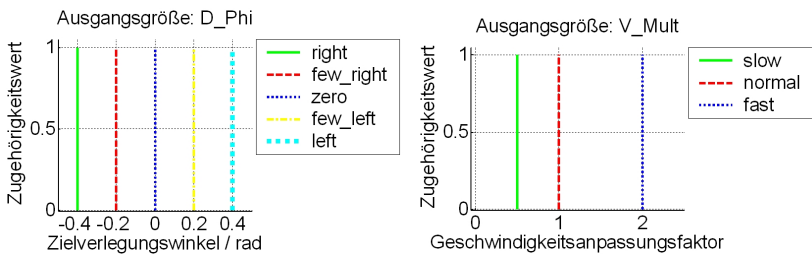


Abbildung 4-14 a u. b: Zugehörigkeitsfunktionen der Ausgänge des Fuzzy-Systems zur Hindernisvermeidung

Tabelle 4-3: Einfaches Regelwerk für das Fuzzy-System zur Hindernisvermeidung

Nr.	IF	AND	AND	AND	THEN
01	F = far	L = far	R = far	-	D_Phi := zero
02	F = near	NOT (L = far)	R = far	-	D_Phi := right
03	F = near	L = far	NOT (R = far)	-	D_Phi := left
04	F = near	L = far	R = far	-	D_Phi := right
05	F = far	NOT (L = far)	R = far	-	D_Phi := few_right
06	F = far	L = far	NOT (R = far)	-	D_Phi := few_left
07	F = far	L = far	R = far	B = far	V_Mult := normal
08	F = far	L = far	R = far	B = near	V_Mult := fast
09	NOT (F = far)	-	-	-	V_Mult := slow
10	NOT (L = far)	-	-	-	V_Mult := slow
11	NOT (R = far)	-	-	-	V_Mult := slow

Die Abbildung 4-15 zeigt die Struktur des Simulationsblockschaltbildes. Ganz rechts ist das beschriebene Bewegungsmodell, welches aus den alten Positionsdaten des letzten Simulationsschrittes und den aktuellen Geschwindigkeiten die neuen Positionsdaten ermittelt. Die beschriebene Verzögerung bei Geschwindigkeitsänderung wird durch ein Verzögerungsglied erster Ordnung angenähert. Die Positionsdaten werden ganz links verwendet, um die aktuellen Sensordaten sowie Winkel und Distanz zum Ziel zu bestimmen. Das Hindernisvermeidungssystem berechnet auf Basis von Sensordaten und Zielwinkel ein virtuelles Ziel und eine Geschwindigkeitsanpassung. Ein Logikelement bestimmt, ob das in jedem Schritt berechnete virtuelle Ziel oder das reale Ziel zu verwenden ist. Als Entscheidungsgrundlage wird der Geschwindigkeitsanpassungsfaktor v_mult verwendet. Ist dieser kleiner als eins, so befindet sich ein Hindernis in Zielrichtung, und das virtuelle Ziel ist zu verwenden.

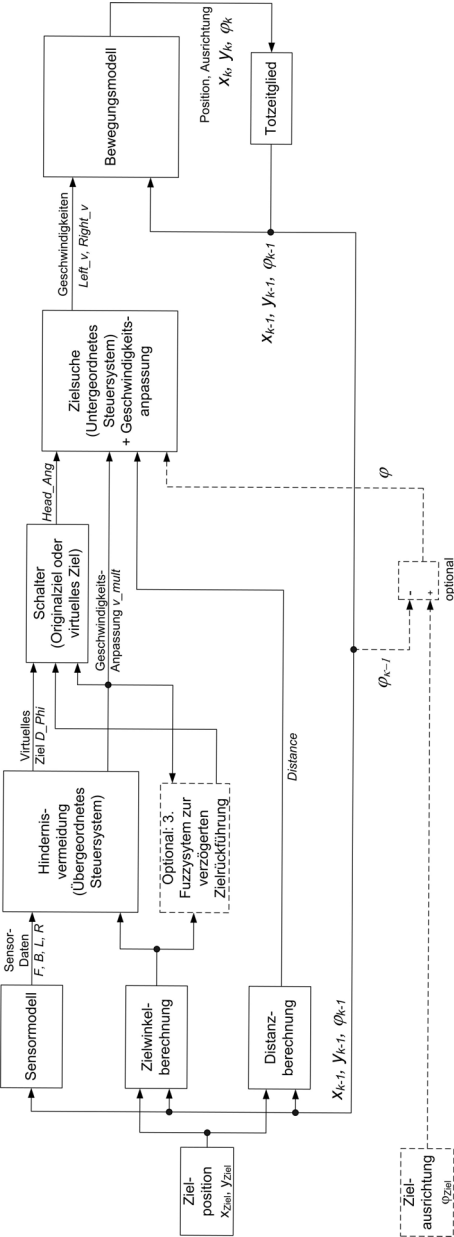


Abbildung 4-15: Struktur der Simulation eines MausI-Systems (Variablenamen gemäß den Ausführungen in kursiv)

Nach dem Umfahren des Hindernisses steigt der Wert von v_mult auf eins an, und das reale Ziel wird verwendet. Der Geschwindigkeitsanpassungsfaktor kann auch bei der optionalen Zielrückführung als Indikator angewandt werden.

Im untergeordneten Steuerungssystem werden die Sollgeschwindigkeiten der Räder wie oben beschrieben auf Basis des Zielwinkels (real oder virtuell) und des Abstandes bestimmt. Optional wird das Fahrzeug im Ziel noch nach Vorgabe ausgerichtet. Beide vom Fuzzy-System bestimmten Geschwindigkeiten werden mit dem Geschwindigkeitsanpassungsfaktor multipliziert. So wird in Hindernisnähe die Geschwindigkeit reduziert, während das Verhältnis der Radumdrehungen zueinander in dem Maße verbleibt, wie das Fuzzy-System es bestimmt hat.

Mit dem bisher vorgestellten Steuerungskonzept lässt sich die Zielfahrt eines mobilen Systems in Räumen mit Hindernissen begrenzter Komplexität gut realisieren. Ein Beispiel ist in der virtuellen Realität in Abbildung 4-16 dargestellt.

In a) hat das MauSI-System sich bereits auf das Ziel ausgerichtet, welches mit dem Pin oben rechts dargestellt wird. Das untergeordnete Fuzzy-System steuert das System nun in direkter Zielrichtung, solange kein Hindernis erkannt wird. Nachdem die Sensoren in b) das Hindernis detektiert haben, wird ein virtuelles Ziel eingeführt. Das tatsächliche, reale Ziel – markiert mit dem dünneren Pin, ist weiterhin bekannt und dient als Eingangsgröße für das übergeordnete Fuzzy-System. Doch hat dieses Fuzzy-System das mit dem dickeren Pin markierte virtuelle Ziel kreiert und seitlich vom Hindernis weggelegt. Dieses virtuelle Ziel dient nunmehr als Eingang für das untergeordnete Fuzzy-System, welches das mobile System in dessen Richtung lenkt. Das virtuelle Ziel wird solange vom Hindernis weggedreht, bis eine kollisionsfreie Umfahrung möglich ist, wie in c) dargestellt.

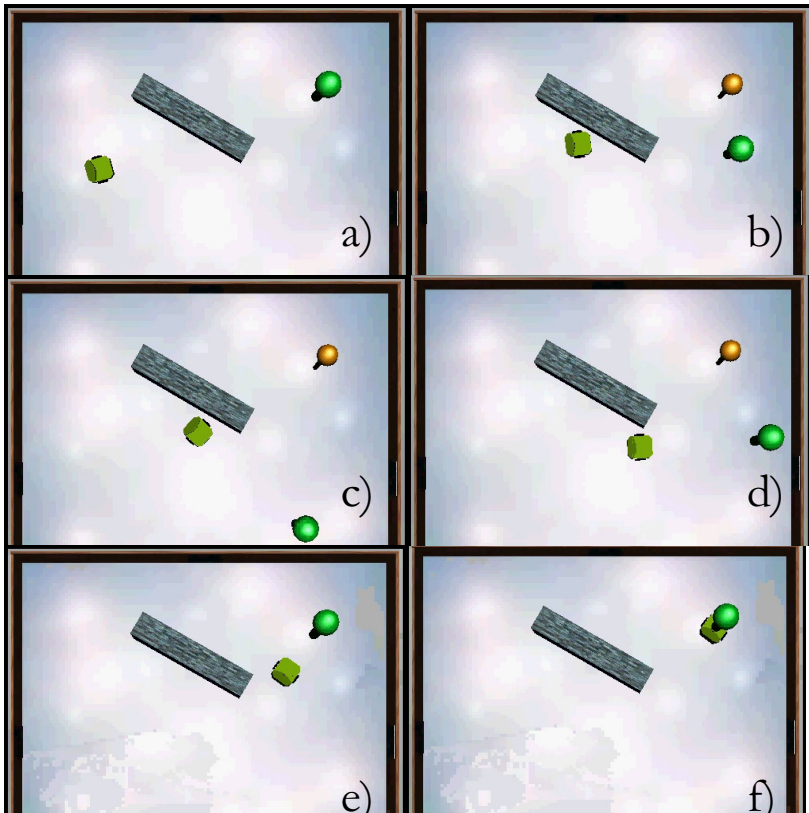


Abbildung 4-16 a-f: Ein einzelner MauSI 2-Roboter bei der Zielfahrt

Nachdem in d) das Ende des Hindernisses erreicht wurde und die Sensoren dies entsprechend detektieren, wird wieder das reale Ziel dem untergeordneten Fuzzy-System übergeben. Diese Rückführung kann in einem Schritt oder auch stufenweise leicht verzögert erfolgen, um ein sanfteres Drehen zu ermöglichen. In der Simulation wird dazu ein einfaches Fuzzy-System verwendet, welches in Abhängigkeit des aktuellen Verschiebewinkels bei der Zurückführung jeweils kleine Verzögerungen (ein bis drei Zeitschritte) einbaut und an dieser Stelle nicht weiter beschrieben werden soll. Schließlich kommt das virtuelle Ziel in e) wieder mit dem realen zusammen, und in f) erreicht der Roboter sein Ziel.

4.2.2 Erweiterung für komplexere Aufgaben

In [Brü02] werden zur Leistungsverbesserung verschiedene, vom Autor vorgeschlagene Modifikationen des Regelwerks des Fuzzy-Hindernisvermeidungssystems untersucht. Die Modifikationen und die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

Tabelle 4-4: Erweiterung des Regelwerkes vom Hindernisvermeidungs-Fuzzy-System zum optimalen Abdrehen bei Fronthindernissen

Nr.	IF	AND	AND	AND	THEN
4.1	F = near	L = far	R = far	Targ_Ang = positiv	D_Phi := right
4.2	F = near	L = far	R = far	Targ_Ang = negativ	D_Phi := left
4.3	F = near	L = far	R = far	Targ_Ang = zero	D_Phi := right

Bei dem in Tabelle 4-3 vorgestellten Regelwerk war Regel 4 dafür verantwortlich, den Roboter bevorzugt nach rechts abdrehen zu lassen, wenn ein Hindernis im Frontbereich und keines in den Seitenbereichen detektiert wird. Die Regeln 4.1 bis 4.3 nach Tabelle 4-4, welche anstelle der ursprünglichen Regel 4 verwendet werden können, lassen den Roboter bevorzugt in die Richtung abdrehen, in welcher das reale Ziel liegt. Nur wenn dieses direkt vor dem Roboter liegt, bleibt rechts die (willkürlich gewählte) Drehrichtung.

Um ein Hindernis zu umfahren, ist in der Regel ein Entlangfahren an der Hinderniswand bis zur Kante notwendig (Wandverfolgung). Um diese Wandverfolgung sanfter zu gestalten, werden die Regeln 5 und 6 des Hindernisvermeidungssystems durch die Regeln 5.1 und 5.2 bzw. 6.1 und 6.2 ersetzt. Dadurch wird der Roboter vom Hindernis weggedreht, solange dieses sich im Nahbereich befindet. Ist es auf der Seite dann im medium-Bereich, wird der Zielwinkel nicht mehr verschoben; der Roboter bewegt sich so parallel zur Hinderniskante. Dies ist auch der Grund, warum die Zugehörigkeitsfunktion

„medium“ der linguistischen Variablen L(eft) und R(ight) trapezförmig gestaltet ist (s. Abbildung 4-13).

Tabelle 4-5: Erweiterung des Regelwerkes vom Hindernisvermeidungs-Fuzzy-Systems zur besseren Wandverfolgung

Nr.	IF	AND	AND	THEN
5.1	F = far	L = near	R = far	D_Phi := few_right
5.2	F = far	L = medium	R = far	D_Phi := zero
6.1	F = far	L = far	R = near	D_Phi := few_left
6.2	F = far	L = far	R = medium	D_Phi := zero

Bei komplexeren Hindernissituationen kann das vorgestellte Fuzzy-System zur Hindernisvermeidung scheitern. In Abbildung 4-17 ist ein raumförmiges Hindernis dargestellt. Links ist das Verhalten des Systems bei der bisher beschriebenen Konfiguration dargestellt. Der Roboter fährt in den Raum, dreht bei Hinderniskontakt nach links ab und folgt dem Wandverlauf. Bei Erreichen des fünften Punktes in der Abbildung wird kein Hindernis mehr wahrgenommen, daher schwenkt der Roboter auf Zielkurs um – und fährt damit in den Raum zurück, was zu einer Endlosschleife führt.

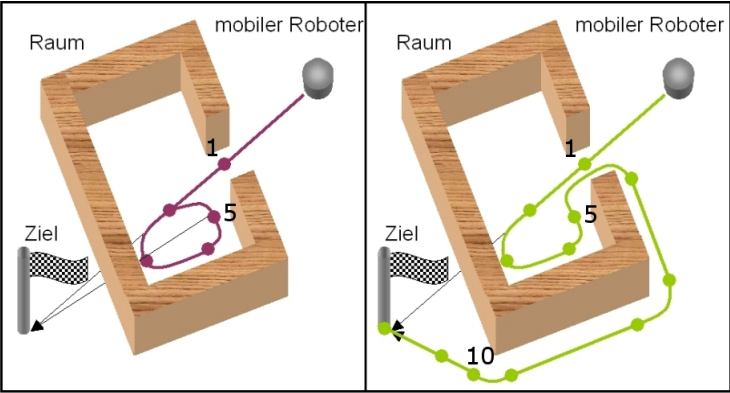


Abbildung 4-17: Verhalten eines MauSI-Systems bei raumförmigen Hindernissen mit dem einfachen Regelwerk (links) und mit dem modifizierten Regelwerk (rechts)

Eine Abhilfe wird durch das Ersetzen der Regeln 5.2 und 6.2 nach Tabelle 4-5 durch die entsprechenden Regeln in Tabelle 4-6 erzielt. Dies führt zu einer verbesserten Wandverfolgung, bei welcher der Roboter der Wand so lange folgt, bis der Zielwinkel durch die Verfolgung der Wand null wird. In rechten Teil der Abbildung 4-17 ist dies dargestellt. Der Roboter folgt auch nach Punkt fünf weiterhin der Wand, da der Zielwinkel im Punkt fünf nicht null ist. Dies führt ihn schließlich zu Punkt 10. Dabei erreicht er durch das Drehen um die Hindernisecke einen Zielwinkel von null Grad. Dadurch wird die Wandverfolgung beendet, und die Fahrt auf das Ziel zu wird wieder aufgenommen.

Tabelle 4-6: Erweiterung des Regelwerkes vom Hindernisvermeidungs-Fuzzy-Systems zur Flucht aus Räumen

Nr.	IF	AND	AND	AND	THEN
5.2.1	F = far	L = medium	R = far	NOT (Targ_Ang = zero)	D_Phi := few_left
5.2.2	F = far	L = medium	R = far	Targ_Ang = zero	D_Phi := zero
6.2.1	F = far	L = far	R = med.	NOT (Targ_Ang = zero)	D_Phi := few_right
6.2.2	F = far	L = far	R = med.	Targ_Ang = zero	D_Phi := zero

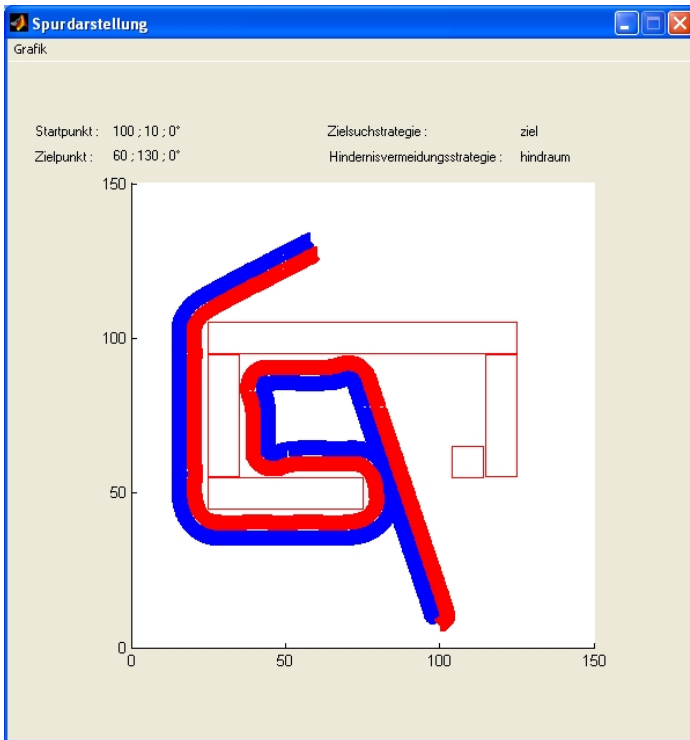


Abbildung 4-18: Spurdarstellung einer gelungenen Raumflucht mit dem modifizierten Fuzzy-System

Abbildung 4-18 zeigt eine entsprechende erfolgreiche Zielfahrt in einer Spurdarstellung unter MATLAB.

Mit dem vorgestellten erweiterten Steuerungskonzept lässt sich das autonome Anfahren von Zielpunkten durch ein mobiles System in Umgebungen mit unbekannten Hindernissen realisieren. Im Folgenden wird die Erweiterung zur Steuerung von Verbänden beschrieben.

4.3 Rudelverhalten von drei „MauSI 2“-Systemen

Eine wesentliche Weiterentwicklung ist die Erweiterung des vorgestellten Konzeptes zur Realisierung von Verbänden aus drei MauSI-Systemen. Dabei soll das bisherige Konzept für die einzelnen Systeme weiterhin verwendet werden. Für die Erlangung der Teamfähigkeit werden Ergebnisse gemäß des Forschungsberichtes der Technischen Universität Ilmenau [GKW03] genutzt.

4.3.1 Erweiterung des Steuerkonzeptes

Ziel der Erweiterung ist die Erlangung der Fähigkeit, drei „MauSI2“-Systeme in vorgegebener Formation ein Ziel in unbekannter Umgebung ansteuern zu lassen. Beim Auftreffen auf Hindernisse soll die beliebige Formation zu einer Linienformation geändert werden, dass heißt, ein Roboter übernimmt die Zielsuche, die anderen Systeme folgen ihm im „Gänsemarsch“. Dadurch lassen sich Gassen passieren, welche schmäler sind als die ursprüngliche Formation.

Vorausgesetzt wird eine Kommunikationsfähigkeit der Roboter untereinander sowie mit einer „zentralen“ Intelligenz, welche in der Realität als Software auf der Hardware eines der Systeme realisiert werden kann. Die Roboter teilen sich dabei gegenseitig regelmäßig ihre Position sowie weitere Parameter mit. Die Aufgaben, welche bisher ein einzelner Roboter lösen musste (Zielanfahrt und Hindernisvermeidung), sind somit um die Aufgaben der Formationserhaltung und der Kollisionsvermeidung der Systeme untereinander erweitert worden.

Die Basisidee, welche zur Realisierung entwickelt wurde, ist in Abbildung 4-19 dargestellt. Prinzipiell bleibt die Steuerungsstruktur mit den beiden übergeordneten Steuerungssystemen auf jedem Einzelsystem erhalten. Es wird jedoch

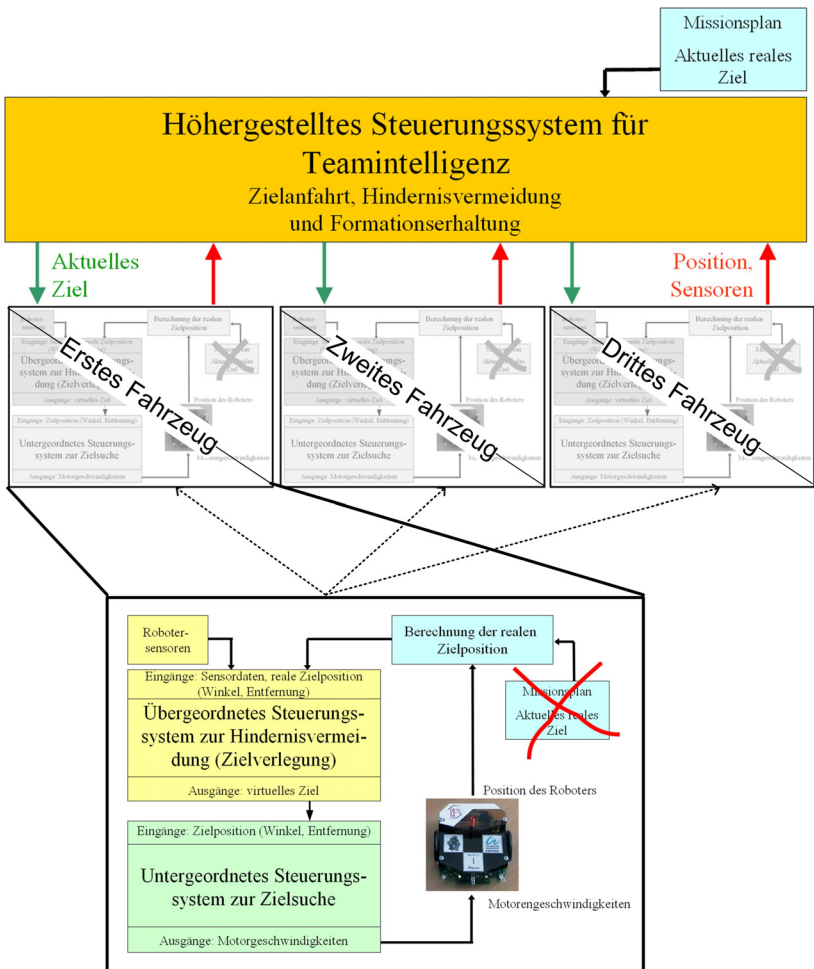


Abbildung 4-19: Übersicht über das erweiterte Steuerungskonzept für das Team. Jedes Fahrzeug wird realisiert gemäß den vorherigen Ausführungen (s. auch Abbildung 4-10); lediglich der Block „Missionsplan – Aktuelles reales Ziel“ ist entfernt, da dieses in der neuen Realisierung vom höhergestellten Steuerungssystem vorgegeben wird.

ein drittes, höhergestelltes Steuerungssystem vorgesehen. Dieses ist, im Gegensatz zu den anderen Steuerungssystemen, nur einmal für das gesamte Team vorhanden. Seine Verantwortung liegt darin, die Fahrzeuge in Formation das Ziel erreichen zu lassen und dabei Kollisionsverhinderung zu garantieren. Dadurch wird die Autonomie der Einzelsysteme eingeschränkt. In der Realisierung folgen sie nicht mehr den realen Zielen ihres Missionsplanes. Sie bekommen ein neues Ziel vom höhergestellten Steuerungssystem übergeben. Dasselbe Prinzip war bereits bei der Autonomie der Einzelsysteme angewandt worden. Das untergeordnete Steuerungssystem bekam dabei vom übergeordneten ein Ziel angegeben, bei welchem es sich entweder um ein virtuelles oder um das reale gehandelt hat. Die Ziele, welche in diesem Fall von der höchsten Steuerungsinstanz an die einzelnen Systeme übergeben werden, können wiederum die realen oder virtuelle sein. Somit kann es für jeden Roboter bis zu drei Ziele geben (ein reales und zwei virtuelle). Dies ist in Abbildung 4-20 dargestellt.

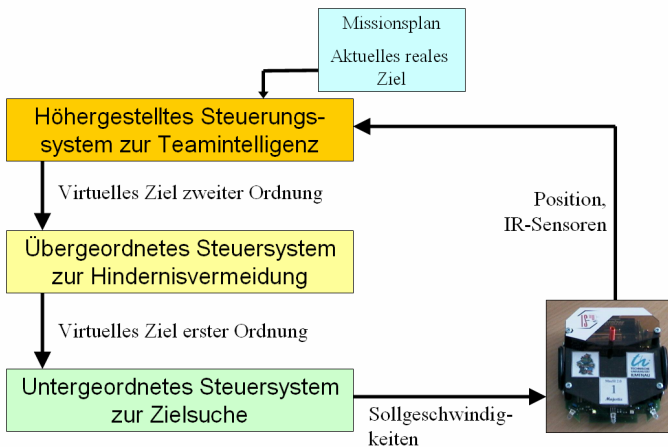


Abbildung 4-20: Steuerungskonzept aus der Sicht des Einzelsystems

Basis für das höhergestellte Steuerungssystem sind die Position der einzelnen Roboter und die Daten ihrer Infrarotsensoren (welche diese ständig an die Zentralsteuerung übermitteln). Daraus ermittelt das System, welcher der drei folgenden Zustände gegeben ist:

1. Direkte Zielanfahrt, da Formation intakt und kein Hindernis in Zielrichtung
2. Formationsherstellung, da Formation nicht intakt und kein Hindernis in Zielrichtung
3. Hindernisumgehung, da Hindernis in Zielrichtung

Im ersten Fall gibt das höhergestellte Steuerungssystem die realen Ziele direkt an die Roboter weiter. Die realen Ziele werden vor der Mission vorgegeben, d.h. es wird eine Endposition für die gesamte Formation vorgegeben, aus welcher sich die realen Zielpositionen für jedes Einzelsystem errechnen lassen.

In den anderen beiden Fällen werden virtuelle Ziele generiert. Außerdem kann das Steuerungssystem über einen Stopp-Befehl die Bewegung der Roboter unterbrechen. Die Roboter selbst unterbrechen ihre Bewegung, um Kollisionen mit anderen Systemen zu vermeiden. Dazu werden den Robotern vor Missionsbeginn Prioritätswerte zugewiesen, die entscheiden, welches System welchem anderem im Bedarfsfall Vorfahrt gewähren muss. Natürlich ist eine Änderung der Prioritäten im Rahmen der adaptiven Autonomie möglich.

Abbildung 4-20 zeigt das Steuerkonzept aus der Sicht eines Einzelsystems. Dieses nimmt den Gruppencharakter der Anordnung nicht wahr, es „sieht“ lediglich drei hierarchisch angeordnete Steuersysteme, wobei es selbst seine Position und die Sensordaten an das höhergestellte weitergibt. Jenes gibt entweder das originale reale Ziel aus dem Missionsplan weiter, oder es generiert ein virtuelles Ziel zweiter Ordnung, welches die Aufgabe gewährleistet, eine Formation (wieder)herzustellen oder strategisch das Team um ein Hindernis zu führen. Das mittlere Steuersystem gibt entweder das vom höhergestellten

System übergebene Ziel weiter, oder es errechnet ein eigenes Ziel (virtuelles Ziel erster Ordnung), um für das eigene Fahrzeug eine Hindernisumfahrung zu erreichen. Das System der untersten Instanz berechnet die Radumdrehungen, um das Ziel zu erreichen, ohne genaue Kenntnis zu haben, aus welchem Grund das aktuelle Ziel angefahren werden soll. So entsteht ein vollständig hierarchischer Aufbau.

4.3.2 Höhergestelltes Steuersystem und adaptive Autonomie

Die beschriebene Realisierung lässt sich ebenfalls im Rahmen der adaptiven Autonomie darstellen. Die Befugnisse der einzelnen Systeme und der Zentralsteuerung werden nach festen Regeln stets an die gegebene Situation angepasst. Das zugrunde liegende Schema ist als Zustandsgraf des höhergestellten Steuerungssystems in Abbildung 4-21 dargestellt.

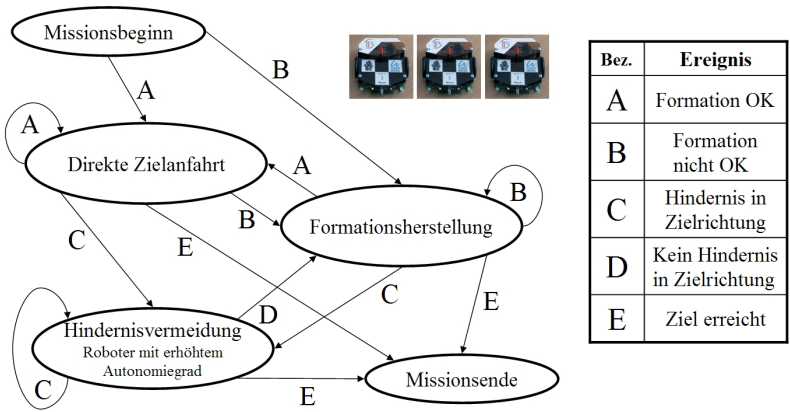


Abbildung 4-21: Zustandsgraf des höhergestellten Steuerungssystems

Die drei Zustände, welche während der Missionsausführung eingenommen werden können, sind ‚Direkte Zielfahrt‘, ‚Formationsherstellung‘ und ‚Hindernisvermeidung‘. Nach Missionsstart wird in einen der beiden ersteren umgeschaltet, üblicherweise in die Formationsherstellung. Dabei übernimmt die zentrale Intelligenz eine übergeordnete Rolle im erhöhten Autonomiegrad. Sie berechnet neue reale Ziele für die Systeme, um eine Formation zu erreichen oder bei Abweichung während der Ausführung selbige wiederzuerlangen. Dieser Zustand wird daher immer dann aktiv, wenn die Formation nicht intakt ist. Dies geschieht üblicherweise immer zu Beginn und nach Hindernisumgehung sowie auch im Zustand der direkten Zielfahrt, wenn der durch kleine Abweichungen im Laufe der Zeit entstehende Formationsfehler ein Toleranzmaß übersteigt.

Dagegen arbeiten die Roboter im Zustand der direkten Zielfahrt mit erhöhter Autonomie. Sie erfüllen die Funktionen, welche in Kapitel 4.2 beschrieben wurden, weitestgehend selbständig, ohne größere Rücksicht zu nehmen auf die übrigen Teammitglieder. Die Aufgabe der Zentralsteuerung beschränkt sich dabei auf regelmäßige Überwachung des Formationszustandes. Nur im Falle der Abweichung muss gehandelt werden. Ansonsten führen drei Systeme unabhängig voneinander einzelautonome Aufgaben aus. Dies gestattet, alle Fähigkeiten, welche für die Einzelautonomie entwickelt und getestet wurden, direkt zu übernehmen.

Im Zustand der Hindernisvermeidung, welche bei Detektion eines Hindernisses durch ein System aufgerufen wird, kommt es zu einer starken Abwandlung der Teamhierarchie. Zunächst wird das Fahrzeug zum Anführer bestimmt, welches sich am nächsten am Ziel befindet. Diese feste Regel gewährleistet eine eindeutige Entscheidung, welche zudem im Allgemeinen zu einem verhältnismäßig geordneten Umfahren des Hindernisses führen wird. Dadurch wird ein wesentliches Element des vorgeschlagenen Autonomiekonzeptes deutlich. Bei Systemen mit gleicher Ausstattung kann die Führer-Funktion an

jedes Fahrzeug fallen. Die Entscheidung muss im jeweiligen Fall getroffen werden, wobei klare Regeln eine eindeutige Situation erzwingen müssen.

Das Führungsfahrzeug übernimmt dann selbständig in hoher Autonomie die Suche eines Weges um das Hindernis herum auf, wobei es vollständig seine entsprechenden einzelautonomen Fähigkeiten anwendet. Es findet keine Überwachung der Route durch die Zentralsteuerung statt. Die anderen Fahrzeuge operieren in einem geringer autonomen Zustand, da sie lediglich dem Führungsfahrzeug bzw. dem zweiten in der aktuell gültigen Hierarchie folgen. Doch wird ihnen dabei auch die Möglichkeit gegeben, selbständig Abweichungen zur Hindernisvermeidung durchzuführen (s. Beispiel in Kapitel 5.1).

Die Umschaltung zwischen den Zuständen erfolgt gemäß der Tabelle innerhalb von Abbildung 4-21 anhand von genau definierten Übergängen. Somit ist stets ein Zustand aktuell, und eine eindeutige Teamhierarchie gegeben. Darauf ist bei Realisierungen von Teams unbedingt zu achten. Teamstrukturen müssen sich nach genau festgelegten Regeln bilden bzw. verändern, um Eindeutigkeit zu gewährleisten. Von realen Anwendungen würden nicht zuletzt juristische Vorraussetzungen erfordern, dass Verantwortungen genau verteilt sind. Ein unregelmäßiger Missionsabbruch wurde aufgrund des relativ einfachen Missionsaufbaus nicht umgesetzt.

4.3.3 Realisierung des vorgeschlagenen Konzeptes

Abbildung 4-22 zeigt exemplarisch den Aufbau der Steuerung für drei Roboter. Im linken Teil sind die Blöcke mit der Beschriftung Roboter 1 bis 3 zu sehen. Diese enthalten im Wesentlichen die Funktionalität, wie sie bereits für die Einzelsysteme beschrieben wurde und in der Abbildung **4-15** dargestellt ist. Die wesentliche Änderung betrifft das Sensormodell (s. den entsprechenden Kasten in Abbildung **4-15** sowie die Ausführungen in Kapitel 4.1.2). Dieses

wurde dahingehend erweitert, dass nicht nur die bestehenden Hindernisse bei Unterschreitung einer bestimmten Entfernung wahrgenommen werden, sondern auch die jeweils anderen beiden Roboter. Dabei wurden die Roboter als Viereck gemäß ihrer äußeren Form angenommen, so dass in jedem Abtastschritt eine Abstandsbestimmung zu acht weiteren Kanten pro Sensor vorgenommen werden muss, welche sich von der Vorgehensweise nicht von den Beschreibungen in Kapitel 4.1.2, Formeln 4-9 bis 4-20, unterscheiden. Das Sensormodell für Roboter i liefert also für jede der vier Sensorgruppen F (ront), L (eft), R (ight) und B (ack) den entsprechenden Wert F_i , L_i , R_i und B_i zurück, welcher dem niedrigsten Abstand eines der Sensoren in der jeweiligen Sensorengruppe zu einer Hinderniskante **oder** einem anderen Roboter entspricht. Dies entspricht auch der realen Situation. In dieser würde auch jeder Sensor einen Wert liefern, und es wäre nicht zu erkennen, ob der Sensor ein Hindernis oder einen anderen Roboter detektiert hat.

Weiterhin wurde im Block „Steuerungs- und Bewegungsmodell“ die Möglichkeit vorgesehen, die Bewegung von außen vorübergehend zu stoppen. Dies geschieht über Warte-Befehle, welche jedes Robotermodell entweder von dem jeweils ihm zugeteilten Block „Bewegungsfreigabe“ oder vom zentralen „Konvoizusammenhalt“-Block enthält. So lange jeder dieser beiden Befehle den logischen Wert 0 hat, wird im Inneren des Steuer- und Bewegungsmodells des Roboters dem Block „Bewegungsmodell“ (s. Abbildung 4-15) die vom Block „Zielsuche“ bestimmten Geschwindigkeiten für die beiden Räder als Sollwerte übergeben. Hat einer der beiden Warte-Befehle den Wert 1, so wird für beide Geschwindigkeiten der Wert 0 übergeben. Der Roboter bleibt stehen, bis ihm wieder die Freigabe erteilt wird.

Jeder Block mit Steuerungs- und Bewegungsmodell liefert als Ausgang die jeweilige aktuelle Position zum Zeitschritt k (x_k^i, y_k^i) im Raum sowie die Sensordaten (F_i, L_i, R_i, B_i). Als Schnittstelle zwischen dem jeweiligen Einzelmodell und dem Teammodell dienen die jeweiligen Zieldaten (x_{Ziel}^i, y_{Ziel}^i für Roboter i), welche vom Block „Konvoifestlegung“ berechnet werden. Diese können, wie

bereits beschrieben, das reale Ziel oder ein virtuelles Ziel zweiter Ordnung sein; dies ist für das Bewegungsmodell nicht unterscheidbar. Die Blöcke „Konvoifestlegung“ und „Konvoizusammenhalt“ stellen also das höhergestellte Steuerungssystem nach Kapitel 4.3.1 dar und befinden sich auf der Hardware eines der Roboter oder auf einem zentralen Rechner. Die weiteren Ausführungen dieses Unterkapitels beschreiben Aufbau und Funktion der Blöcke „Konvoifestlegung“ und „Konvoizusammenhalt“ des neu hinzugekommenen Steuerungssystems sowie die Blöcke „Bewegungsfreigabe“, welche für jedes einzelne System hinzugenommen wurden. Zielstellung ist die Bestimmung der aktuellen Zieldaten (x_{Ziel_i}, y_{Ziel_i} für Roboter i) sowie der Warte-Befehle.

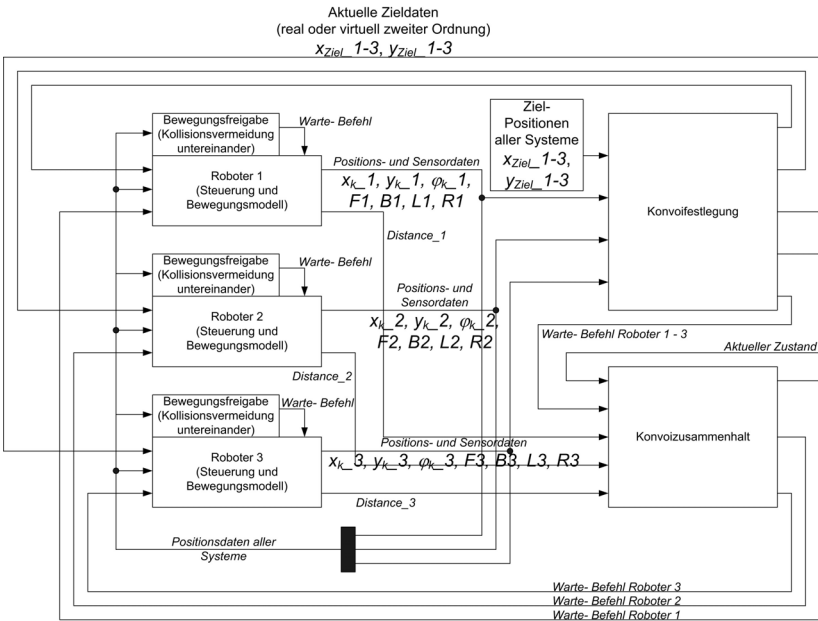


Abbildung 4-22: Struktur der Simulation eines MauSI-Teams (Variablenamen gemäß den Ausführungen in kursiv)

Die Verwendung des in Kapitel 4.2 vorgestellten Hindernisvermeidungssystems bewirkt, dass die Roboter sich auch gegenseitig umfahren können. Es kann nur in den Zuständen „Hindernisumgehung“ und „Formationsherstellung“ auftreten, dass die Roboter aneinander vorbeifahren müssen, da sie sich ansonsten in ihrer Formation bewegen, was eine Vorbeifahrt ausschließt. Im Falle der Vorbeifahrt besteht ein erhöhtes Kollisionsrisiko, da sich beide Systeme bewegen. Sie könnten sich gegenseitig den Weg blockieren. Daher wurde für jeden Roboter der Block „Bewegungsfreigabe“ eingeführt. Außerdem besitzt jeder Roboter eine eigene Priorität, die auch den anderen bekannt ist. Wenn ein Roboter durch Auswerten der Positionsdaten der anderen Systeme feststellt, dass seine Entfernung zu einem anderen Roboter mit höherer Priorität einen bestimmten Wert unterschreitet, so bleibt er stehen, bis sich das System mit der höheren Priorität entfernt hat. Die Prioritätsvergabe erfolgt willkürlich und kann auch im Laufe der Mission abgeändert werden. So erhält im Zustand „Hindernisumgehung“ der Roboter, welcher eigenständig nach dem Ziel sucht, die höchste Priorität. Er kann sich somit vorrangig bewegen.

Die Aufgabe des Blockes „Bewegungsfreigabe“ ist bewusst einfach gehalten. Es kommt dort eine Software zum Einsatz, welche eine Schleife für jeden anderen Roboter einmal durchläuft. Ist die Priorität des anderen Roboters größer als die eigene, so wird die Entfernung zu ihm mit Hilfe des Sensormodells berechnet. Unterschreitet die Entfernung ein eingestelltes Minimum, so wird der Warte-Befehl auf 1 gesetzt. Die Bestimmung der Entfernung würde in der Realität einfach durch Auswertung der eigenen und der fremden Positionsdaten, die durch Kommunikation bekannt ist, erfolgen. In der Simulation wurde auf das Sensormodell zurückgegriffen, da dieses vorliegt und sowieso angewendet werden muss. Abbildung 4-23 zeigt den Ablaufplan des Blockes „Bewegungsfreigabe“.

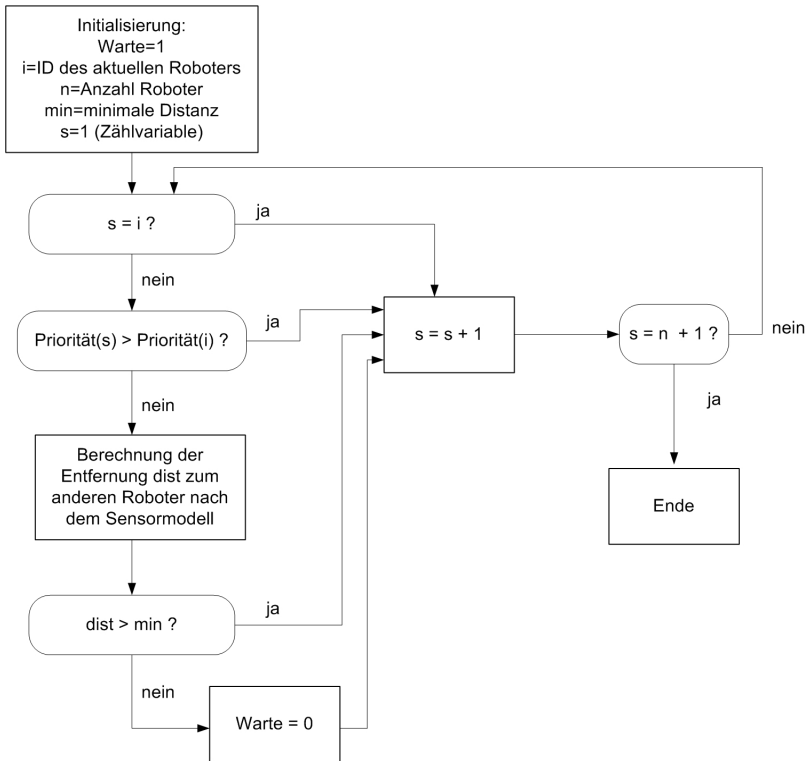


Abbildung 4-23: Ablaufplan für den Block "Bewegungsfreigabe"

Das zentrale Element der Steuerstruktur in Abbildung 4-22 ist der Block „Konvoifestlegung“. Er ist verantwortlich für die Bestimmung des aktuellen der drei genannten, möglichen Zustände sowie für die Ausgabe der jeweiligen Zielpunkte für die Roboter. Dies können jeweils die realen Ziele sein oder virtuelle Ziele zweiter Ordnung. Wie bereits erwähnt, steht die Information bezüglich der realen Ziele nicht mehr den Einzelsystemen zur Verfügung, sondern der Zentralen Instanz. Diese muss auch festlegen, wann diese Ziele erreicht sind und die Mission somit endet (vergl. Abbildung 4-19 und Abbildung 4-20).

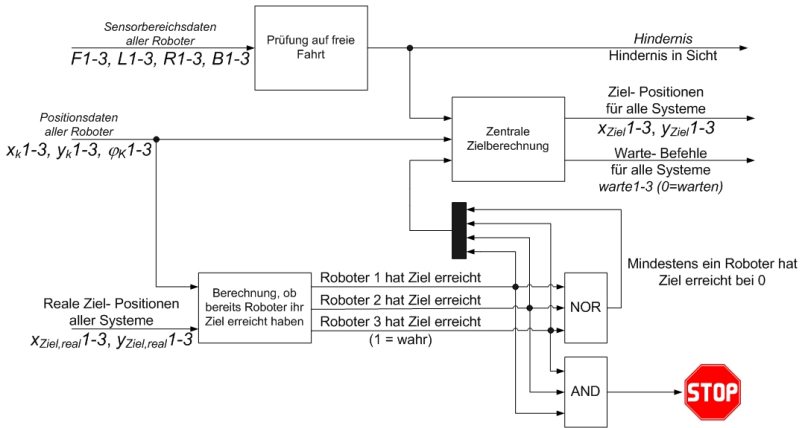


Abbildung 4-24: Struktur des Blockes "Konvoifestlegung"

Abbildung 4-24 zeigt die Struktur des Blockes „Konvoifestlegung“. Im oberen Bereich befindet sich der Block „Prüfung auf freie Fahrt“. Der Block kreiert die Meldung *Hindernis*, welche angibt, ob irgendein System ein Hindernis sieht oder nicht. Mit ihrer Hilfe kann also entschieden werden, ob in den Zustand „Hindernisumgehung“ geschaltet werden muss bzw. ob dieser Zustand wieder verlassen werden kann. Dazu ist folgendes anzumerken:

Es wird davon ausgegangen, dass die Roboter in normaler Formation so weit auseinander sind, so dass ihre eher kurzreichenden Sensoren keines der anderen Systeme wahrnehmen können. Damit wird sichergestellt, dass nur dann in den Zustand „Hindernisumgehung“ geschaltet wird, wenn ein tatsächliches, statisches Hindernis wahrgenommen wird. Ebenso wird der Zustand „Hindernisumgehung“ erst dann verlassen, wenn nicht nur kein reales Hindernis mehr gesehen wird, sondern wenn auch die Roboter weit genug auseinander sind; es kann bei der Hindernisumfahrung durchaus dazu kommen, dass die Roboter sich kurzzeitig sehr nahe kommen. Dass die Roboter wieder ausreichend Abstand zueinander einnehmen, ist die Aufgabe des Blockes „Konvoizusammenhalt“. Sollte dieses Steuerkonzept für Systeme mit langreichenden Sensoren

Anwendung finden, so ist ein Toleranzabstand zu wählen, welcher unterhalb der Sollabstände in den vorgesehenen Formationen liegt.

Bei der beschriebenen Umsetzung wird eine Hilfsvariable verwendet, welche auf 1 gesetzt wird, wenn in einem Sensorbereich ein Wert unter dem Maximum steht; sonst auf 0. Es werden jeweils die Werte dieser Hilfsvariablen aus den letzten zehn Rechenschritten gespeichert. Der Ausgang *Hindernis* wird nur dann auf 0 gesetzt, wenn die Hilfsvariable nicht nur in diesem, sondern auch in den vergangenen zehn Rechenschritten 0 war. Somit wird erreicht, dass nach Umfahren eines Hindernisses das Team noch eine kurze Weile im Zustand „Hindernisumgehung“ verbleibt, um sich weiter zu entfernen. Ansonsten würde sofort versucht, die eigentliche Formation wieder herzustellen. Dabei könnte dann ein System wieder einen Teil des Hindernisses wahrnehmen, und es käme zu ständigen Sprüngen zwischen den Zuständen „Hindernisumgehung“ und „Formationsherstellung“.

Eine weitere wichtige Aufgabe dieses Blockes besteht in der Änderung der Bewegungsprioritäten, wenn in den Zustand „Hindernisvermeidung“ geschaltet wird. Ist die erwähnte Hilfsvariable im aktuellen Rechenschritt 1, war aber in allen gespeicherten zurückliegenden Rechenschritten 0, so wird neu in den Zustand „Hindernisumgehung“ geschaltet. In diesem Fall werden die Distanzen der Roboter zu dem Zielpunkt des eigentlichen Führungssystems mit Hilfe des Satzes des Pythagoras berechnet. Die Prioritäten werden dann gemäß den Abständen neu vergeben, so dass der Roboter, der am nächsten am Ziel ist, die höchste Bewegungspriorität erhält. Es wird also bereits entschieden, welches System die anderen bei der bevorstehenden Hindernisumgehung führen wird. Es bleibt festzuhalten, dass diese Prioritätswahl nicht immer das optimale Resultat liefert. Jedoch könnte das optimale Resultat nur bei genaueren Informationen über Größe und Form des detektierten Hindernisses ermittelt werden, was nach Aufgabenstellung nicht gegeben ist. Der vorgeschlagene Ansatz zeigte im Test sehr sanfte Übergänge von der Ausgangs- in die Linienformati-

on. Es kommt selten zum Überholen oder Kreuzen der Roboter untereinander.

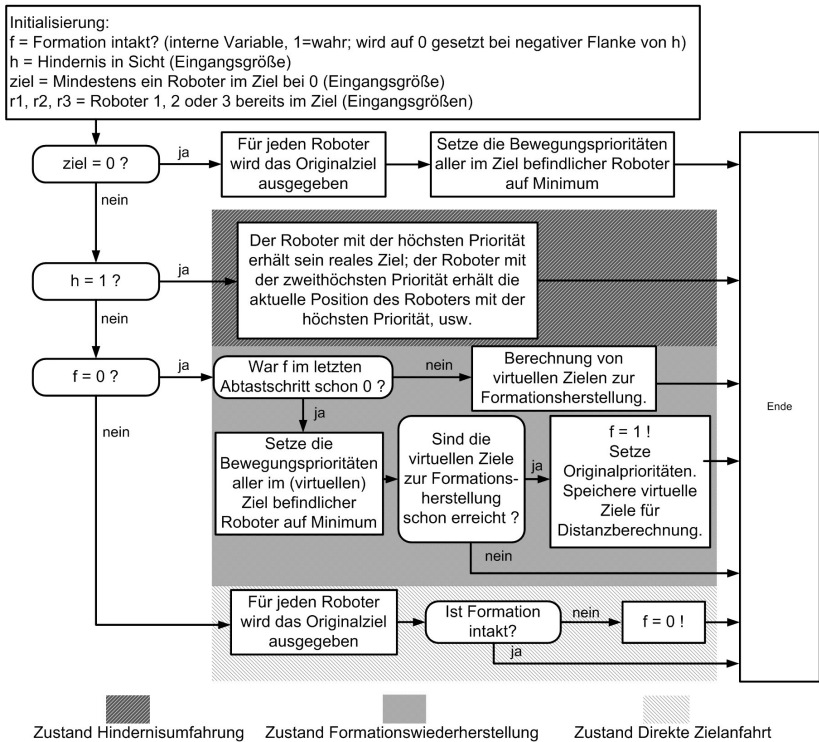


Abbildung 4-25: Ablaufplan für den Block "Zentrale Zielberechnung"

Der Block „Zentrale Zielberechnung“ nimmt die Unterscheidung der drei Zustände „Direkte Zielfahrt“, „Formationsherstellung“ und „Hindernisumgehung“ vor und reagiert entsprechend. Als Eingangsgrößen erhält er die aktuellen Positionen aller Roboter sowie die Informationen, ob und wenn ja welcher Roboter bereits sein reales Ziel erreicht hat. Die Ausgangsgrößen sind die aktuellen Zielpositionen für alle Systeme (reale oder virtuelle Ziele zweiter

Ordnung) sowie Warte-Befehle für die einzelnen Roboter. Die Funktionalität ist durch den Ablaufplan in Abbildung 4-25 dargestellt.

Gemäß Ablaufplan wird zunächst überprüft, ob sich bereits mindestens ein Roboter im realen Ziel befindet. Wenn ja, so kann davon ausgegangen werden, dass auch die anderen Systeme ihre realen Missionsziele fast erreicht haben. In Formationsfahrt werden sie sie in den nächsten Rechenschritten erreichen, eine weitere Formationsherstellung lohnt nicht mehr. Deshalb erhält jeder Roboter direkt sein reales Ziel. Die Bewegungsprioritäten aller bereits im Ziel befindlicher Systeme werden auf einen Minimalwert gesetzt. So wird verhindert, dass ein Roboter mit global niedriger Priorität vor einen Teamkollegen höherer Priorität anhält, obwohl letzterer bereits sein Ziel erreicht hat und sich ergo nicht mehr bewegen wird.

Ist noch kein Roboter im Ziel, so stellt die Software fest, welcher der drei Zustände aktiv ist. Wenn ein Hindernis in Sicht ist, so wurde dies bereits im Block „Prüfung auf freie Fahrt“ festgestellt und dem Block „Zentrale Zielberechnung“ über die Variable *Hindernis* mitgeteilt. Ebenfalls wurde bereits eine geeignete Änderung der Bewegungsprioritäten vorgenommen. In der „Zentralen Zielberechnung“ muss nun lediglich noch dem Roboter mit der höchsten Priorität sein reales Ziel zugewiesen werden. Der Roboter mit der zweithöchsten Priorität erhält die Position des Roboters mit der höchsten Priorität als Ziel, und so weiter.

Liegt keine Hindernisumgehung vor, so prüft der Algorithmus als nächstes den Zustand der internen Variablen *f* ab. Ist diese Variable null, so ist eine Formationswiederherstellung erforderlich bzw. ist gerade in der Ausführung. Wurde neu in diesen Zustand geschaltet, so erfolgt zunächst die Berechnung von virtuellen Zielen zweiter Ordnung für alle Roboter, um eine Formationswiederherstellung zu gewährleisten. Dazu wird für alle Systeme der Abstand zu ihren Zielen berechnet. Liegt dieser unterhalb einer bestimmten Grenze, so lohnt sich die Neuausrichtung nicht mehr, und die Systeme erhalten direkt ihre

realen Ziele. Ansonsten erhält das System mit der kürzesten Zielentfernung die höchste Priorität, und die virtuellen Ziele werden von seiner Position aus berechnet. Es erhält seine eigene, aktuelle Position als Ziel und bleibt somit stehen. Die Ziele der anderen Systeme werden ausgehend aus dieser Position gemäß den Sollabständen der vorgegebenen Formation bestimmt, wobei noch eine Drehung um den Zielwinkel des Führungssystems vorgenommen wird. Somit entstehen Zielpositionen für die Systeme, welche eine intakte Formation mit Ausrichtung auf das Ziel gewährleisten. Diese Ziele bleiben aktiv, bis sie erreicht sind oder in den Zustand „Hindernisumgehung“ gewechselt wird.

Ist eine Formationsherstellung bereits im Gange (f ist 0 und war dies auch schon im letzten Rechenschritt), so wird zunächst überprüft, ob bereits einer oder mehrere der Roboter ihr jeweiliges virtuelles Ziel zweiter Ordnung erreicht haben. Wenn ja, so wird jeweils deren Bewegungspriorität auf ein Minimum gesetzt. Außerdem wird ein entsprechender Warte-Befehl für diese Systeme generiert, damit sie in ihren Positionen stehen bleiben, bis alle Systeme ihr Ziel erreicht haben. Ist das der Fall, so ist die Formation wieder hergestellt und in Zielrichtung ausgerichtet. Dann wird f auf 1 gesetzt, die Roboter erhalten alle wieder ihre globalen Bewegungsprioritäten, und die virtuellen Ziele werden gespeichert, um in einem anderen Teil des Algorithmus zur Prüfung auf intakte Formation verwendet zu werden. Es wurde also in den Zustand „Direkte Zielfahrt“ geschaltet.

Wird der Block „Zentrale Zielberechnung“ im Zustand „Direkte Zielfahrt“ aufgerufen ($f=1$, $b=0$, $z_{ie} \neq 1$), so erhalten die Roboter ihre realen Ziele. Dabei wird der Zielwinkel des Führungsroboters mit der höchsten Priorität berechnet, um die Ziele aller anderen Systeme um eben diesen Wert um das reale Ziel des Führungsroboters zu rotieren. Dadurch ist gewährleistet, dass sich die Systeme in der gewünschten Formation ins Ziel bewegen. Natürlich kann es zu Abweichungen kommen, wenn die Geschwindigkeiten der Systeme nicht vollständig übereinstimmen. In der Realität wird dies immer gegeben sein, da kein mobiles System eine vorgegebene Geschwindigkeit exakt einnehmen kann.

Somit wird es immer Differenzen zwischen den Systemen geben, welche zu Verschiebungen in der Formation führen. Abhilfe kann dadurch geschaffen werden, dass die Geschwindigkeiten auf Grundlage der Positionsdaten ständig verändert werden, wie etwa in [Gha+05] vorgeschlagen. Für die beschriebene Simulation reicht es aus, die Distanzen zu berechnen, welche jedes System zu seinem letzten virtuellen Ziel zweiter Ordnung zurückgelegt hat. Unterscheiden sich diese Werte bei den Robotern signifikant, so wird f auf null gesetzt, und somit im nächsten Abtastschritt wieder eine Formationsherstellung vorgenommen.

Der Block „Konvoizusammenhalt“ in Abbildung 4-22 generiert ebenfalls einen Warte-Befehl für jeden Roboter und führt ihn mit dem Warte-Befehl des Blockes „Konvoifestlegung“ zusammen. Dieser Block wird nur im Zustand „Hindernisumgehung“ benötigt, um zu verhindern, dass sich das im Gänsemarsch bewegende Team zu weit voneinander entfernt. Den umgekehrten Fall, ein zu nahes Zusammenrücken, verhindert der Block „Bewegungsfreigabe“, der gemäß den Ausführungen einen Roboter niederer Priorität warten lässt, sobald er einen Minimalabstand zu einem vorausfahrenden Roboter unterschreitet. „Konvoizusammenhalt“ arbeitet genau andersherum: Es wird für jeden Roboter der Abstand zu seinem in der Prioritätsliste unmittelbar folgenden Roboter ermittelt. Überschreitet dieser einen vorgebbaren Maximalwert, wird der Warte-Befehl für den Roboter mit der höheren Priorität auf 1 gesetzt, sonst auf 0. Befindet sich die Software nicht im Zustand „Hindernisumgehung“ oder hat bereits mindestens ein Roboter sein finales Ziel erreicht, setzt „Konvoizusammenhalt“ alle seine Warte-Befehle auf 0. Im letzten Fall können dadurch zwar auch höhere Abstände entstehen, dies wird beim letzten Abschnitt der Mission aber in Kauf genommen.

Entsprechend den Ausführungen wird der eben beschriebene Warte-Befehl für jeden Roboter mit dem jeweiligen Warte-Befehl aus dem Block „Konvoifestlegung“ verknüpft und dann in das jeweilige Robotermodell geführt. Der Robo-

ter darf sich nur bewegen, wenn alle seine Warte-Befehle (von „Konvoifestlegung“, von „Konvoizusammenhalt“ und von „Bewegungsfreigabe“) auf 0 stehen. Ist ein Wert 1, so hält er an, bis wieder Freigabe erfolgt.

Mit dem beschriebenen Ansatz lässt sich die Aufgabenstellung der Zielsuche in Gegenden mit unbekannten Hindernissen erfüllen. Ein Beispiel dafür wird in Kapitel 5.1 gegeben. Weitere Ergänzungen zu diesem Vorschlag wurden in verschiedenen Arbeiten getestet. In [Mey04] wurde bei Hindernisdetektion der am nächsten am Zielpunkt befindliche Roboter wie beschrieben mit der selbstständigen Zielsuche beauftragt. Gleichzeitig erging derselbe Auftrag jedoch auch an den Roboter am anderen Ende der Formation; dieser musste sich jedoch zu Beginn in die andere Richtung drehen. Auf diese Weise umfuhren die beiden Roboter das Hindernis auf unterschiedlichem Wege, während der Rest des Teams wartete. Somit sollte der energieoptimale Weg für den Rest des Teams gefunden werden. Die Funktion dieses Ansatzes konnte nachgewiesen werden; allerdings wurde die Lösung in der vorliegenden Konstellation als nicht praxistauglich befunden. Während in dem vorgestellten Ansatz die Hindernisumfahrung als beendet angenommen wird, sobald kein Roboter mehr ein Hindernis wahrnimmt, mussten die Erkundungssysteme in [Mey04] zusätzlich noch überprüfen, ob bereits genug Platz bestand, um die gesamte Formation wiederherzustellen. Da jedoch, wie beschrieben, die Sensorreichweite geringer angenommen wurde als der typische Abstand innerhalb der Formation, mussten die Erkundungssysteme erst das komplette Formationspattern abfahren, ehe sie eine Entscheidung treffen konnten. Oftmals tauchte dann doch noch ein Teil des Hindernisses im Sichtbereich auf, so dass die Überprüfung abgebrochen werden musste, damit sich die Erkundungsroboter weiter vom Hindernis wegbewegen konnten. Die gesamte Umfahrt nahm demnach wesentlich mehr Zeit in Anspruch. Praxistauglichkeit wäre nur bei sehr großen Teams gegeben, wo für den wartenden Rest ein deutliches Einsparpotential bestünde, oder bei unterschiedlich ausgestatteten Robotern in gefährlichen Szenarien.

Als Ausblick wurde weiterhin die Möglichkeit von spontanen Prioritätsänderungen bei einem nicht Vorankommen im Zustand „Hindernisumfahrung“ vorgeschlagen. So könnte bei stark komplexen Hindernissen (z.B. engen Sackgassen) der Führungsroboter in einer Ecke eingeklemmt werden. Die folgenden Systeme kämen ihm nahe und würden aufgrund ihrer niedrigeren Priorität sich nicht mehr bewegen. Damit würde für den Führungsroboter kein Weg mehr frei sein. Bei einem entsprechend auftretenden Stillstand könnte die Prioritätsreihenfolge umgekehrt werden. Somit würde dann der Roboter mit der ehemals niedrigsten Priorität, welcher sich nach Definition ja am Ende der Formationslinie befand, zum neuen Führer. Er würde auf jeden Fall einen freien Ausweg finden, da der Weg, auf dem er in die Sackgasse eingefahren ist, nicht von anderen Systemen versperrt wäre. Er würde auch nicht versuchen, weiter in die Sackgasse einzudringen, da er die vor ihm befindlichen Systeme ja als Hindernisse detektieren würde. Somit wäre auch diese Situation zu lösen. Es bleibt anzumerken, dass bei der in diesem Kapitel beschriebenen Vorgehensweise die Systeme immer nahe beieinander bleiben. Dies ist als Vorteil anzusehen; es garantiert am ehesten für Kommunikations- und Einsatzfähigkeit bei unterschiedlich ausgestatteten Systemen. Der Nachteil, dass viele Systeme auf engem Raum schwieriger zu kontrollieren sind, konnte mit dem vorgestellten Ansatz ausgeglichen werden.

4.3.4 Zusammenfassende Wertung des hybriden Ansatzes

In den letzten Kapiteln wurde eine Möglichkeit zur praktischen Umsetzung des theoretischen Konzeptes der adaptiven Autonomie präsentiert. Sie wurde für Einzelsysteme umgesetzt und auf neuartige Weise für Teammissionen

erweitert. Es wurde dabei gezeigt, dass das Teamverhalten unter Beibehaltung der bereits bestehenden Mechanismen für einzelautonomes Verhalten durch Hinzufügen einer weiteren Steuerungsebene möglich ist.

Dieser Umstand ist im Hinblick auf eine industrielle Nutzung sehr bedeutsam, wenn heterogene Systeme verschiedener Hersteller zum Einsatz kommen sollen. Eine Nutzung bereits vorhandener Automatismen ist dabei aus vielen Gründen erwünscht. Zum einen haben sie sich vielfach bereits bewährt. Zum anderen besteht eine weitere Absicherung, wenn sämtliche Schutzmechanismen, die für einzelautonomes Verhalten zur Verfügung stehen, auch im Teammodus zum Einsatz kommen können. Ein weiterer Vorteil der zusätzlich vorgesehenen Zentralsteuerung unter Nutzung von allen bereits bestehenden Automatismen liegt in der Forderung der Fahrzeughersteller nach Geheimhaltung. Die genauen Funktionsweisen der Einzelautonomie müssen nicht vollständig aufgedeckt werden. Es ist ausreichend, wenn genau definierte Schnittstellen zum einzelautonomen Verhalten geschaffen sind. Solche Schnittstellen bestehen normalerweise sowieso bei einzelautonomen Systemen zur Verfügung, um eine (Offline-) Kontrolle des Verhaltens durch einen Operateur zu ermöglichen, der nicht zwangsläufig in die genaue Realisierung der Steuerung eingeweiht sein muss. Daher kommen entsprechende Mechanismen wie bisher vorgeschlagen auch bei Projekten zu ersten realen Umsetzungen von Teamverhalten autonomer Fahrzeuge zur Anwendung (s. Kapitel 6.1.2, [Gre07], [Glo+07]). Weiterhin werden diese Resultate in Kapitel 4.6 mit den Ausführungen der nächsten Abschnitte verglichen und eingeordnet.

4.4 Schwarmverhalten von biologischen und technischen Systemen

Im Kapitel 4.3 wurden Roboterteams aus wenigen, technisch gut ausgestatteten Systemen betrachtet. Dem wurde vom Autor ein anderer Ansatz entgegen gestellt, in welchem die Verbände aus einer Vielzahl von einfach aufgebauten Systemen bestehen. Als Vorlage für entsprechende Betrachtungen bieten sich entsprechende biologische Systeme wie Ameisen- oder Termitenschwärme an. Diese bestehen aus einfachen Individuen mit üblicherweise geringen Handlungs- bzw. Aktionsmöglichkeiten. Dennoch ist ihr Gesamtverhalten oft von komplexer und selbstoptimierender Natur. Dabei ist in der Regel weder eine führende Instanz noch die Fähigkeit zu komplexer Kommunikation vorhanden, wie bei dem Ansatz des vorangegangenen Kapitels vorausgesetzt wurde.

Gerade durch die Zielstellung, mit Systemen geringer technischer Ausstattung komplexe Aufgaben zu realisieren, ist in diesem Bereich besonders mit dem Auftreten von Emergenz zu rechnen. So wird beispielsweise in [Gro+89] ausgesagt: „Schwarmintelligenz ist das intelligente Zusammenarbeiten vieler kleiner Einheiten, um ein größeres, für einen Einzelnen nicht erreichbares Ziel zu verwirklichen.“

Da die in diesem Zusammenhang zu untersuchenden Systeme nicht über die Fähigkeiten zur direkten Kommunikation verfügen, müssen Informationen auf „anderem“ Wege ausgetauscht werden, da dies die absolute Voraussetzung für jedwede Kooperation ist. In der Biologie hat sich der Begriff „Stigmergie“ entwickelt, der vom Biologen Grassé in [Gra59] geprägt wurde (s. auch [Mas02]). Dieser beschäftigte sich mit der indirekten Kommunikation von Termiten beim Nestbau, welche mit dem zufälligen Ablegen von Erdhäufen beginnen. Dort, wo diese Haufen mit signifikanter Dichte beieinander liegen, bauen die Termiten an bereits vorhandene Haufen an, und das Nest wächst an

dieser Stelle. Durch das Ausbringen eines bestimmten Pheromons kann der Weiterbau an einer bestimmten Stelle verhindert werden. Allgemein formuliert, kann Stigmergie als Kommunikation in großen dezentralen Systemen bezeichnet werden, welche auf der Modifikation der Umwelt beruht. Ähnliche Verfahren werden auch von Ameisen angewandt. Verschiedene Ansätze simulieren ein entsprechendes Verhalten (z.B. [DMC96]). Auch im Bereich der Multi-Agenten-Technologie (z.B. [Wei99]) kommen entsprechende Verfahren zum Einsatz.

Entsprechende Untersuchungen wurden vom Autor vorgenommen, werden aus Platzgründen jedoch an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt. So wurde etwa im Rahmen von [Gra04] die Simulation einer Ameisenkolonie auf Futtersuche realisiert. Die Vorgehensweise und Resultate lassen sich als Beispiel eines dezentral realisierten Teams mobiler Systeme verstehen. Mit dieser Realisierung der Simulation eines Ameisenschwarmes auf Futtersuche wurde die prinzipiell mögliche Umsetzung des biologischen Konzeptes aufgezeigt. Denkbar wäre diese Strategie für einen Verbund aus einfachen Systemen auf niedrigem technischem Niveau, ohne direkte Kommunikationsmöglichkeit. Auch die Sensorik zur Hindernisvermeidung kann sehr einfach und mit kurzer Reichweite ausfallen. Zum Gelingen der Mission ist prinzipiell eine höhere Zahl an mobilen Systemen notwendig als bei Verwendung der im Kapitel 4.3 beschriebenen Strategien.

Die Nutzung von Duftspuren, welche von den simulierten Ameisen ausgelegt werden, hat sich als sehr effizienzsteigernd erwiesen. Besonders ermöglichen sie den zielgerichteten Abbau von hochqualitativem Futter. Aufgrund des Verdampfens der Duftstoffe bleiben nur solche Routen aktiv, welche ständig von Ameisen mit Futterstücken begangen werden. Dadurch wird eine hohe Adaptivität erreicht, besonders wenn es zu Veränderungen im Missionsgebiet kommt (plötzlicher Wegfall einer Futterquelle, Hinzukommen neuer Futterquellen oder Hindernisse). Für die Umsetzung in reale Applikationen erscheinen die Verwendung von Duftstoffen und der Einsatz olfaktorischer Sensoren

aus vielerlei Gründen wenig sinnvoll. Es müssen alternative Methoden zum Einsatz kommen, welche die Vorteile des Pheromonkonzeptes nachbilden, ohne den realen Aussatz von Duftstoffen zu beinhalten. Ein entsprechendes Konzept wurde in [Hol04] unter Mitarbeit des Autors vorgeschlagen, wo der gefundene Ansatz simulativ auf mobile Roboter übertragen wurde.

Die in [Hol04] gezeigten Resultate verdeutlichen die Möglichkeit, die bei der Simulation des Ameisenschwarmes auf Futtersuche gewonnenen Erkenntnisse auf das Wegsuchproblem für mobile Systeme zu übertragen. Teams mit großen Mitgliederzahlen lassen sich somit zur Kooperation bringen, auch wenn die technischen Fähigkeiten der Einzelsysteme (besonders die Kommunikationsfähigkeit) gering sind. Die von den Ameisen übernommene Kommunikation mittels Pheromonen wurde dabei in Form einer Entscheidungsmatrix umgesetzt. In diese konnten die Systeme ihre Erkenntnisse (gefundene kurze Wegstrecken) nach Verlassen des Missionsgebietes (also nach Rückkehr) eintragen. Eine Zentralsteuerung suchte nach möglichen Abkürzungen und trug auch diese in die Matrix ein. Die aktualisierte Matrix wurde den neu aufbrechenden Systemen mitgegeben, welche die Entscheidung über ihre Wegwahl an jedem Punkt basierend auf stochastischen Prozessen und den Werten der Entscheidungsmatrix bestimmten. Somit wurde sichergestellt, dass sich der größte Teil des Teams auf dem bisher bekannten, kürzesten Weg ins Ziel bewegte, während einzelne Systeme immer wieder nach noch kürzeren Strecken suchten. Somit konnte in diesem Fall auch das in der Aufgabenstellung (Kapitel 2.4) gestellte Problem der Wegsuche in unbekanntem Gebiet gelöst werden.

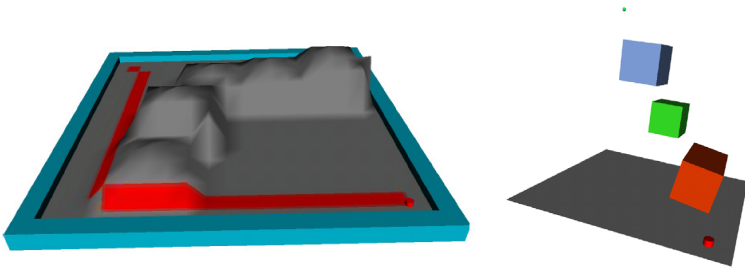


Abbildung 4-26 a & b: Erweiterung des Konzeptes in die dritte Dimension ([Sch05])

Es wurde eine Kooperation zur Wegoptimierung auf einem niedrigen Niveau erreicht. In weiterführenden Arbeiten, wie etwa in [Sch05], wurde das Konzept in die dritte Dimension erweitert. Dabei wurden einerseits Landfahrzeuge betrachtet, welche sich in einem gebirgigen Gelände fortbewegen müssen. Der jeweilige Energieverbrauch zur Bewältigung von Steigungen kann vorgegeben werden, so dass der direkte Weg nicht immer der energieoptimale ist (Abbildung 4-26 a). Andererseits wurden Szenarien betrachtet mit mobilen Systemen, welche sich dreidimensional bewegen können und in einem Einsatzgebiet mit räumlichen Hindernissen einen optimalen Weg suchen müssen (Abbildung 4-26 b). Reale Anwendungen dafür könnten sich im Unterwasserbereich oder im Weltraum ergeben. Es wurde gezeigt, dass die vorgestellten Realisierungen auch für diese Szenarien anwendbar sind. Weiterführende Forschungen in dieser Richtung könnten beispielsweise Verbesserungen anstreben, in welchen die Knotendichte in bekannten, hindernisfreien Abschnitten schrittweise verringert wird.

Es sei nochmals auf die unterschiedlichen Kommunikationsmerkmale der in den Kapiteln 4.3 und 4.4 vorgestellten Realisierungen hingewiesen. In Kapitel 4.3 war eine direkte Kommunikationsfähigkeit der Systeme untereinander vorausgesetzt worden. Nachrichten oder Befehle konnten direkt von einem System zu einem anderen gesandt werden. Einschränkungen in der Kommunikationstopografie können es erforderlich machen, Nachrichten über andere Systeme bzw. Relais- oder Basisstationen umzuleiten. Ein entsprechender

Aufbau ist im linken Block der Abbildung 4-27 dargestellt. Obwohl es keine Direktverbindung zwischen jedem System gibt, kann dennoch von jedem System eine Nachricht oder ein Befehl an jedes andere System weitergeleitet werden.

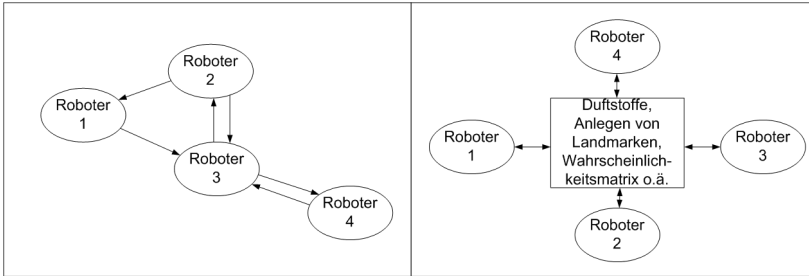


Abbildung 4-27: Direkte (links) und indirekte Kommunikation (rechts)

Demgegenüber steht das indirekte Kommunikationsmodell, bei welchem keine Nachrichten oder Befehle von einem System zu einem anderen übertragen werden können, sondern lediglich über ein anderes Medium Informationen ausgetauscht werden können (rechter Block in der Abbildung 4-27), etwa Duftstoffe in [Gra04] oder eine Wahrscheinlichkeitsmatrix in [Hol04]. Der auf diese Weise übertragbare Informationsgehalt ist deutlich geringer als bei der direkten Kommunikation. Daher können eher Hinweise übertragen werden als direkte Befehle.

Diese konträren Kommunikationsmöglichkeiten resultieren in unterschiedlichen Realisierungen der Steuerungskonzepte. Könnte in den vorgestellten Konzepten zur Steuerung der MauSI-Systeme nach [GKW03] oder [Mey04] in Kapitel 4.3 einzelnen Robotern genaue Anweisungen erteilt und somit eine zielgerichtete Kooperation in einer hierarchischen Ordnung umgesetzt werden, wurden in [Gra04] und [Hol04] über Pheromone und Wahrscheinlichkeitsmatrizen lediglich Handlungsalternativen aufgezeigt. Um dennoch ein quasikooper-

ratives Verhalten zu erreichen, mussten stochastische Methoden angewandt werden, um unterschiedliche Alternativen auszuprobieren, wobei die Wahrscheinlichkeit für die Alternativen mit den besten Resultaten erhöht wurde. Aufgrund dieser Vorgehensweise entsteht unter den Fahrzeugen keine hierarchische Struktur, und im Vergleich zu den Realisierungen mit direkter Kommunikation sind im allgemeinen mehr Fahrzeuge nötig, um eine schnelle Reaktion auf Änderungen der Wahrscheinlichkeiten (in der Matrix oder durch neue bzw. verdampfte Pheromone) zu erreichen. Prinzipiell konnte das gestellte Problem der Wegfindung in unbekanntem Gelände jedoch gelöst werden.

Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die vorgestellten Konzepte bei indirekter Kommunikation stark auf stochastischen Methoden beruhen. Dies erschwert das Nachvollziehen der algorithmischen Schritte, da hier das Zufallsprinzip eine wichtige Rolle spielt. Eine zielgerichtete Fehlersuche, etwa im Bereich des Software Debuggings, ist oftmals nicht oder nur unter erschwerten Bedingungen möglich. Außerdem wirft der Ansatz im Bereich von juristischer Verantwortlichkeit einige Fragen auf. Wie bei der Auswertung gezeigt wurde, ist der Verlust einzelner Systeme nicht auszuschließen, was bei realen Anwendungen in fast allen Fällen nicht zulässig ist. Dies muss bei der realen Umsetzung bedacht werden.

4.5 Analytischer Ansatz zur Beschreibung des Teamverhaltens

In der Literatur finden sich unterschiedliche Ansätze für die Steuerungssoftware zur Erlangung des Teamverhaltens. Oftmals wird dabei von größeren Teams (fünf und mehr Fahrzeugen/ Roboter) ausgegangen, welche wiederum aus sehr einfach modellierten Einzelsystemen bestehen. Es besteht also ein Zusammenhang zu den im Kapitel 4.4 vorgestellten Lösungen. An dieser Stelle

soll der Fokus auf die Realisierung der Einzelsysteme als Doppelintegratoren gerichtet werden, wie sie sich in der Literatur etwa in [ADK05] oder [ES05] finden. Der Regelalgorithmus bestimmt dann die Beschleunigung a , welche auf das System aufweisen soll. Alternativ kann auch die Kraft F bestimmt werden, welche durch Division mit der Systemmasse m auf die Sollbeschleunigung a überführt werden kann. Durch zweifache Integration lässt sich zunächst die Geschwindigkeit v und schließlich die Position p bestimmen.

Üblicherweise wird auf eine genauere Modellierung, wie sie etwa in Kapitel 4.1.1 für das Robotersystem „MauSI“ vorgenommen wurde, verzichtet. Dies ist teilweise im entstehenden hohen Rechenaufwand in der Simulation begründet. Stattdessen werden Kräfte, Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Positionen unabhängig voneinander in den beiden (oder drei) Dimensionen berechnet. Es wird also ein holonomes Fahrzeug angenommen, welches sich im zweidimensionalen Raum frei bewegen kann. Auf dem Land kann dies etwa durch den Einsatz von omnidirektionalen Rädern oder Kugelrädern erreicht werden. Ein entsprechendes System, welches sich am Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik der Technischen Universität Ilmenau im Einsatz befindet und von Festo AG & Co. KG entwickelt wurde, ist in Abbildung 4-28 und Abbildung 4-29 dargestellt. Durch eine entsprechende Anordnung von drei omnidirektionalen Rädern im Winkel von jeweils 120° wird das Fahrzeug befähigt, sich in jede Richtung zu bewegen. Allerdings sind entsprechende Räder sehr anfällig gegen Verschmutzungen. Daher werden solche Systeme am ehesten auf glatten, ebenen Untergründen eingesetzt, d.h. im Indoorbereich. Damit ist die Funktion im Wesentlichen auf Demonstrationsplattformen beschränkt.



Abbildung 4-28: Das Robotersystem „Robotino“ mit drei omnidirektionalen Rädern

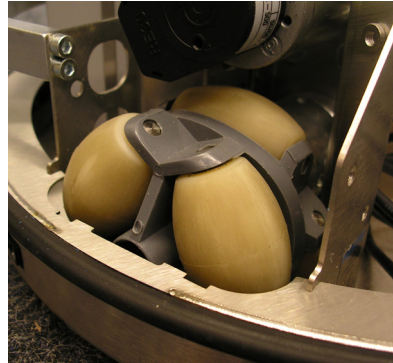


Abbildung 4-29: Dank drei dieser omnidirektionalen Rädern in einer um jeweils 120 Grad versetzten Anordnung kann der Robotino sich in beiden Flächendimensionen unabhängig bewegen

An dieser Stelle werden die Untersuchungen und Ausführungen aus [ES05] als Grundlage der eigenen weiterführenden Arbeiten zusammengefasst. Auf Basis von [ES05] erfolgte eine Umsetzung der beschriebenen Vorgehensweise unter MATLAB, welche im Folgenden vorgestellt wird. Auf diesem Wege soll die Vorgehensweise untersucht, eingeordnet und weiterentwickelt werden.

4.5.1 Modellierung eines Fahrzeugteams als Flüssigkeitstropfen

Auch bei diesem Ansatz stehen Beobachtungen aus der Biologie im Mittelpunkt, etwa von Fischschulen oder Vögelschwärmen. Reynolds definiert in [Rey87] drei einfache Regeln für das Verhalten von Individuen in größeren Schwärmen in Relation zu den unmittelbaren Nachbarn: (1) Vermeide Gruppenbildung (separation), (2) Passe die Bewegungsrichtung an (alignment), (3)

Vermeide Trennung (cohesion). Auf dieser Grundlage entwickelten Elkaim und Siegel in [ES05] ein Steuerungssystem für ein Team aus mobilen Robotern mit omnidirektionalen Bewegungsfähigkeiten. Diese sollen sich in Formation bewegen und Hindernisse umfahren. Die Bezeichnung „Flüssigkeitstropfen“ (liquid droplet) entstand aus der Beobachtung, wie ein entsprechender Tropfen unter den Bedingungen von Oberflächenspannung und Gravitation in der Lage ist, Hindernisse zu umfließen.

Die Formation wird dabei definiert in Relation zu einem *Virtual Leader*, einem nicht vorhandenem Fahrzeug. Die Einzelsysteme besitzen ein definiertes Verhältnis zu diesem *Virtual Leader*, welches sie fortlaufend versuchen aufrechtzuerhalten. Ein Bewegen des *Virtual Leader* „von außen“ führt dadurch auch automatisch zur Bewegung des gesamten Teams. Zur Realisierung dieses Verhaltens werden eine Reihe von Beziehungen zwischen einzelnen Objekten definiert, welche sich wie mechanische Federn verhalten. Drei unterschiedliche Beziehungen werden unterschieden: (A) Fahrzeug zu Fahrzeug, (B) Fahrzeug zu *Virtual Leader*, (C) Fahrzeug zu Hindernis. Beziehung (A) ist dabei für die oben aufgeführte separation and cohesion zuständig, (B) übernimmt das alignment, (C) ist verantwortlich für die Hindernisvermeidung.

Man kann sich also im Prinzip vorstellen, dass sich zwischen den Objekten mechanische Federn befinden. Diese sind in ihrem Gleichgewichtszustand, wenn die Fahrzeuge im gewünschten Zustand zueinander und zum *Virtual Leader* stehen (d.h. wenn die Formation intakt ist) und wenn theoretisch jedes Hindernis unendlich weit entfernt ist. Jede Abweichung von diesem Idealzustand „spannt“ virtuelle Federn, wodurch Kräfte auf die Fahrzeuge ausgewirkt werden. Aufgabe des Steuerungssystems ist es, jeweils die aktuellen Kräfte zu berechnen und an das Antriebssystem zu übergeben, welches eine entsprechende Bewegung der Systeme verursacht. Im Folgenden werden die Berechnungen dieser Teilkräfte beschrieben, welche vom Autor basiert auf [ES05] für die Realisierung des Simulators unter MATLAB verwendet wurden. Für jedes

i -te von n Systemen soll dabei eine Summenkraft F_s^i bestimmt werden, getrennt nach Komponenten in x - und y -Richtung:

$$F_s^i = \begin{bmatrix} F_{s,x}^i \\ F_{s,y}^i \end{bmatrix}. \quad (4-21)$$

Diese Kraft setzt sich zusammen aus den unter (A) aufgeführten Kräften zwischen den Fahrzeugen, F_{ij} (wobei nur die Beziehungen zu den beiden Nachbarfahrzeugen berücksichtigt werden), der Kraft zum *Virtual Leader*, F_{vl}^i , sowie der Hindernis-Summenkraft F_{ob}^i :

$$F_s^i = F_{ij}^{i+1} + F_{ij}^{i-1} + F_{vl}^i + F_{ob}^{i+1}. \quad (4-22)$$

Wie bereits ausgeführt, beruht jede dieser Teilkräfte auf dem Prinzip einer (eindimensionalen) mechanischen Feder. Diese erzeugt eine Kraft F_{Feder} in Abhängigkeit einer Federkonstanten K_{Feder} und einer Ablenkung Δs von einem Gleichgewichtspunkt. Damit gilt:

$$F_{Feder} = K_{Feder} \cdot \Delta s. \quad (4-23)$$

Die Berechnung der Kräfte zwischen den Fahrzeugen beruht auf der aktuellen Position des jeweiligen Fahrzeuges sowie seiner beiden unmittelbaren Nachbarn (diese Position muss entsprechend fortwährend über den Kommunikationskanal übertragen werden), außerdem auf den Sollentfernungen zwischen den Fahrzeugen, welche diese in der geforderten Formation haben. Befindet sich das zu betrachtende Fahrzeug i in x_i, y_i , eines der Nachbarfahrzeuge j in x_j, y_j und sei außerdem die Entfernung zwischen diesen beiden Fahrzeugen in der gewünschten Formation beschrieben mit d_{x0}^{ij} bzw. d_{y0}^{ij} , so ergibt sich:

$$F_{ij} = K_{ij} \cdot \begin{bmatrix} d_x^{ij} - d_{x0}^{ij} \\ d_y^{ij} - d_{y0}^{ij} \end{bmatrix} \quad \text{mit} \quad d_x^{ij} = x_j - x_i; \quad d_y^{ij} = y_j - y_i. \quad (4-24)$$

Wie man Gleichung 4-24 entnehmen kann, ist die resultierende Kraft zwischen zwei Fahrzeugen in einer Dimension dann null, wenn ihr aktueller Abstand zueinander genau dem Sollwert nach Formationsdefinition entspricht. Ansons-

ten entsteht eine vorzeichenbehaftete Kraft, welche bestrebt ist, den Sollzustand herzustellen. Die Federkonstante K_{ji} kann dabei identisch für alle Fahrzeuge gewählt werden; ebenso kann aber auch für jedes Fahrzeugpaar ein individueller Wert gewählt werden.

Die Berechnung der Kraft zum *Virtual Leader* erfolgt vollkommen analog. Befindet sich der *Virtual Leader* in x_{vl}, y_{vl} und sei außerdem die Entfernung zwischen diesen beiden Fahrzeugen in der gewünschten Formation beschrieben mit d_{x0}^{vl} bzw. d_{y0}^{vl} , so ergibt sich:

$$F_{vl} = K_{vl} \cdot \begin{bmatrix} d_x^{vl} - d_{x0}^{vl} \\ d_y^{vl} - d_{y0}^{vl} \end{bmatrix} \quad \text{mit} \quad d_x^{vl} = x_{vl} - x_i; \quad d_y^{vl} = y_{vl} - y_i \quad (4-25)$$

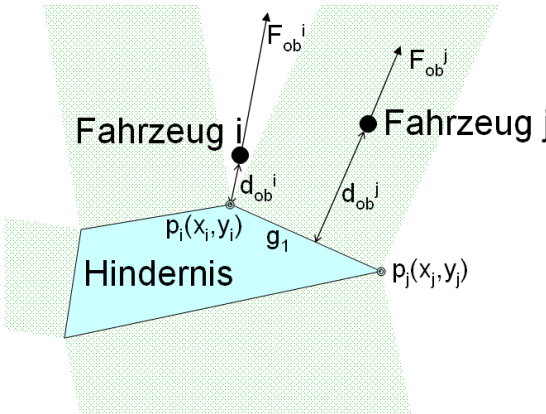


Abbildung 4-30: Hindernis mit Projektionsflächen und Fahrzeugen

Für die Hinderniskraft wird angenommen, dass jedes Hindernis eine abstoßende Kraft auf jedes Fahrzeug aufprägt, die sich antiproportional zur Entfernung zwischen Fahrzeug und Hindernis verhält. Die Hindernisse werden als konvexe Polygone angenommen. Ziel ist die Berechnung des Abstandes d_{ob} . Zur Berechnung des Abstandes muss zunächst festgestellt werden, ob sich ein

Fahrzeug in einer Projektionsfläche vor einer Hinderniskante aufhält (schraffiert in Abbildung 4-30, Fahrzeug j in Projektionsfläche) oder in einem der Keile dazwischen (wie Fahrzeug i).

Ein Fahrzeug hält sich genau dann in der Projektionsfläche zur Kante zwischen den Hindernispunkten $p_i(x_p, y_i)$ und $p_j(x_p, y_j)$ auf, wenn der Lotfußpunkt $l(x_l, y_l)$ des Fahrzeuges auf der Gerade g_l durch p_i und p_j zwischen den beiden Hindernispunkten liegt; wenn also folgende Bedingung erfüllt ist:

$$x_l \geq \min(x_i, x_j) \wedge x_l \leq \max(x_i, x_j) \wedge y_l \geq \min(y_i, y_j) \wedge y_l \leq \max(y_i, y_j). \quad (4-26)$$

Der Lotfußpunkt berechnet sich als Schnittpunkt von der Gerade g_l und der Gerade g_2 , deren Steigung senkrecht zu der von g_l ist und die durch die aktuellen Koordinaten des Fahrzeuges (x_F, y_F) geht. Damit gilt:

$$g_1: y - y_i = m \cdot (x - x_i) \quad \text{mit} \quad m = \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i} \quad (4-27)$$

$$g_2: y - y_F = m_\perp \cdot (x - x_F) \quad \text{mit} \quad m_\perp = \frac{x_i - x_j}{y_j - y_i}. \quad (4-28)$$

Durch Gleichsetzen von Gleichung 4-27 und 4-28 erhält man:

$$x_l = \frac{m \cdot x_i - m_\perp \cdot x_F + y_F - y_i}{m - m_\perp} \quad (4-29)$$

$$y_l = y_i + m \cdot (x_l - x_i). \quad (4-30)$$

Der gesuchte Abstand des Fahrzeuges vom Hindernis, d_{ob} , wird mit dem Satz des Pythagoras zwischen Fahrzeugposition und Lotfußpunkt berechnet. Da die Bedingung nach Gleichung 4-26 auch erfüllt ist, wenn sich das Fahrzeug auf der anderen Seite der Kante (also auch auf der anderen Seite des Hindernisses) befindet, erhält man möglicherweise mehrere gültige Lotfußpunkte. Es wird dann für jeden der Abstand berechnet und der geringste Wert für d_{ob} angenommen. Wird kein gültiger Lotfußpunkt gefunden, so befindet sich das Fahrzeug in einem der Keile zwischen den Projektionsflächen. In diesem Fall

wird der Abstand zwischen dem Fahrzeug und allen Eckpunkten des Hindernisses bestimmt und der geringste Wert für d_{ob} angenommen.

Die Abstände werden für jedes Fahrzeug jeweils für alle vorhandenen Hindernisse bestimmt. Die Hinderniskraft berechnet sich dann zu:

$$F_{ob} = \sum_{k=1}^n \frac{K_{ob}}{d_{ob}^k} \cdot \quad (4-31)$$

In [ES05] wird davon ausgegangen, dass alle Hindernisse vollständig bekannt sind. Es ist jedoch ersichtlich, dass der Algorithmus auch dann funktioniert, wenn jeweils nur die einem Fahrzeug zugewandten Seiten bekannt sind, welche durch Sensorik aufgeklärt werden könnten. Ebenso schlägt [ES05] vor, im Einzelfall zu versuchen, die Abstände in Gleichung 4-31 kubisch oder in höherer Potenz eingehen zu lassen (mit ungeradem Exponenten, um das Vorzeichen beizubehalten). Bei der softwaretechnischen Umsetzung, die im nächsten Unterkapitel beschrieben wird, wurde außerdem die Möglichkeit vorgesehen, die vom Hindernis erzeugten Kräfte ab einer bestimmten Entfernung gänzlich zu unterdrücken. Nur so ist eine vollständige Formationswiederherstellung in Hindernisnähe möglich.

4.5.2 Simulationstool

Gemäß den bisherigen Ableitungen wurde ein Simulationstool unter MATLAB erstellt. Die Berechnung erfolgt zeitdiskret. In jedem Zeitschritt werden die Teilkräfte auf jedes Einzelsystem bestimmt und nach Gleichung 4-22 die Summenkraft berechnet. Es wird angenommen, dass diese Kräfte bzw. die dadurch resultierenden Beschleunigungen in x- und y-Richtung sofort wirken, dass also keine Verzögerung in der Aktorik entsteht bzw. dass diese klein gegenüber der Simulationsschrittweite ist.

Da eine ideale mechanische Feder nach Auslenkung ständig um den Gleichgewichtspunkt schwingt, wurde zusätzlich eine Reibungskraft eingeführt, welche proportional zur Geschwindigkeit dieser entgegenwirkt. Über die Federkonstanten und die Reibungskonstante B kann im Folgenden das gewünschte Verhalten des Teams beeinflusst werden. Eine Verringerung der Reibungskonstante oder eine Erhöhung der Federkonstante bewirkt ein schnelleres Annähern an den Zielpunkt, führt aber auch zu einem Über- und Einschwingen. Werden die Konstanten in die andere Richtung verändert, wird ein Überspringen verhindert, aber die Systeme nähern sich langsamer dem Zielpunkt an. Mit den Zustandsvektoren

$$p_k^i = \begin{bmatrix} x_k^i \\ y_k^i \end{bmatrix}, \quad v_k^i = \begin{bmatrix} v_k^{i,x} \\ v_k^{i,y} \end{bmatrix}, \quad a_k^i = \begin{bmatrix} a_k^{i,x} \\ a_k^{i,y} \end{bmatrix} \quad (4-32)$$

für Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung des i -ten Fahrzeuges zum Zeitschritt k werden folgende Beziehungen verwendet:

$$a_k^i = F_S^i - B \cdot v_{k-1}^i \quad (4-33)$$

$$v_k^i = v_{k-1}^i + T \cdot a_k^i \quad (4-34)$$

$$p_k^i = p_{k-1}^i + T \cdot v_k^i \quad (4-35)$$

Geschwindigkeit und Beschleunigung werden dabei auf einen festlegbaren Maximalwert beschränkt.

Ausschließlich der *Virtual Leader* kann durch den Anwender bewegt werden, indem er einen Zielpunkt vorgibt. Es wird dann ebenfalls eine virtuelle mechanische Feder zwischen dem *Virtual Leader* und dem Zielpunkt angenommen, so dass für die Berechnung der aktuellen Position ebenfalls die Gleichungen 4-32 bis 4-35 verwendet werden können; die in 4-33 verwendete Summenkraft enthält lediglich die mit der Federkonstanten K_{vl} multiplizierten Entfernung zum gewählten Zielpunkt. Es kann auch ein Pfad aus mehreren Zielpunkten eingegeben werden, welche dann nacheinander angefahren werden. In jedem Zeitschritt wird zunächst die aktuelle Position des *Virtual Leader* berechnet,

welche dann anschließend zur Bestimmung der entsprechenden Kraft auf die Einzelsysteme nach Gleichung 4-25 verwendet wird.

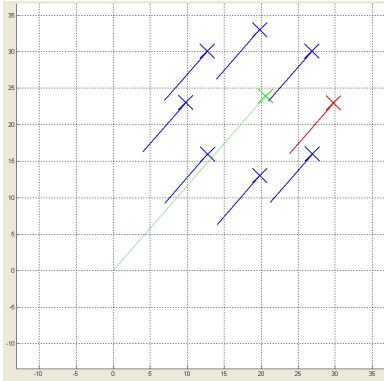


Abbildung 4-31: Acht Fahrzeuge im Teamverband

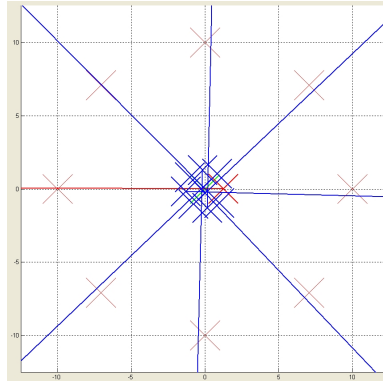


Abbildung 4-32: Massenkarambolage beim Ändern der Formation

Im Simulationstool konnte die Funktion der beschriebenen Algorithmen nachgewiesen werden. Abbildung 4-31 zeigt acht durch Kreuze dargestellte Fahrzeuge in kreisförmiger Formation. Das Kreuz in der Mitte stellt den *Virtual Leader* dar, welcher sich entlang der Linie auf einen vom Anwender gewählten Punkt in nordöstlicher Richtung zu bewegt und sein Ziel fast erreicht hat. Die Linien an den anderen Fahrzeugen stellen die jeweils resultierenden Kräfte inklusive Reibungskraft dar. Da die Formation relativ intakt ist, wirken so gut wie keine Kräfte der Kategorie (A). Der *Virtual Leader* hat sein Ziel beinahe erreicht und wird deswegen bereits langsamer. Die Fahrzeuge haben daher auch ihre relativen Zielpositionen bereits fast erreicht, weswegen die Kräfte der Kategorie (B) ebenfalls nur noch gering ausfallen. Es dominieren die der Geschwindigkeit entgegenwirkenden Reibungskräfte, welche die Fahr-

zeuge abbremsen und auf ihren vorgesehenen Endpositionen zum Stillstand bringen werden.

In [ES05] wird als großer Vorteil dieser Methode genannt, dass nur der Bewegungspfad des *Virtual Leader* geplant werden müsse, während der Algorithmus automatisch kollisionsfreie Pfade für alle Teammitglieder garantiere. Diese Aussage gilt jedoch nur, wenn eine Formation absolut starr bleibt. In [ES05] wird jedoch auch die Möglichkeit zur Änderung der Formation ausdrücklich genannt. Es besteht jedoch eine erhöhte Kollisionsgefahr, da entsprechende Kraftbindungen immer nur zwischen einem Fahrzeug und seinen beiden unmittelbaren Nachbarn besteht. Eine entsprechende Annäherung würde also zum Auftreten einer abstoßenden Kraft führen. Allerdings ist bereits in Gruppen ab vier Fahrzeugen jedes Einzelsystem mit einem anderen System nicht mehr verbunden; diese Systeme könnten sich aufeinander zu bewegen und kollidieren, ohne dass irgendeine Kraft sie daran hindern würde. Aber selbst wenn man – unter deutlicher Erhöhung des Rechenaufwandes, besonders bei großen Teams – jedes Einzelsystem mit jedem anderen virtuell verbinden würde, wäre die Gefahr noch nicht gebannt. Dies soll an folgendem Beispiel verdeutlicht werden.

Es seien wieder acht Fahrzeuge in kreisförmiger Formation gegeben, wie bereits in Abbildung 4-31 gezeigt. Diese befinden sich im Stillstand, die Formation soll im Folgenden um 180 Grad gedreht werden. Es soll also jedes Fahrzeug auf der jeweils gegenüberliegenden Position zum Stillstand kommen. Eine solche Maßnahme wäre in der Realität etwa nötig, wenn sich die Fahrzeuge in einer bestimmten Formation bewegen und Daten mit Sensoren aufnehmen sollen, welche genau ausgerichtet sind. Durch die Kraft (B) werden also alle Fahrzeuge in Richtung ihres Ziels gezogen, welches genau auf der anderen Seite des Formationskreismittelpunktes liegt. In diesem kommt es zur Massenkarambolage, welche durch die (A)-Kräfte nicht vermindert werden kann. Die Fahrzeuge stoßen selbst mit ihren unmittelbaren Nachbarn zusammen, wovor sie eigentlich die (A)-Kräfte schützen sollten. Aber weil auch die

Nachbarfahrzeuge sich auf den Mittelpunkt zu bewegen, heben die jeweils erzeugten Kräfte sich gegenseitig auf. Dies gilt für jedes einzelne Fahrzeug und seine jeweiligen Nachbarn, so dass die (A)-Kräfte in diesem Fall völlig wirkungslos bleiben. Auch wenn man Kräfte von jedem zu jedem Fahrzeug simulieren würde, so käme es doch aufgrund der Symmetrie dazu, dass die Kräfte sich aufheben und die Kollision nicht verhindern könnten. Abbildung 4-32 zeigt diese Situation. Die Fahrzeuge stehen kurz vor der Karambolage; ebenfalls gezeigt wird die auf sie wirkende Gesamtkraft als Linie. Dass nicht alle Linien in einem Winkel von $(i-1) \cdot 45^\circ$ verlaufen, liegt daran, dass die Positionen und Kräfte nacheinander berechnet werden. Dadurch kommt es zu kleinen Abweichungen, welche den Zusammenstoß aber nicht verhindern können.

Im Folgenden soll die Fähigkeit zur Hindernisvermeidung untersucht werden. Zunächst werden zwei unterschiedliche Hinderniskonfigurationen dargestellt, welche problemlos überwunden werden können. In Abbildung 4-33 bis Abbildung 4-36 wird die Durchfahrt durch eine enge Passage zwischen zwei Hindernissen dargestellt. Während der *Virtual Leader* unbeeinflusst von den Hindernissen dem vorgegebenen Pfad folgt, wird das Fahrzeugteam von den Anti-Hinderniskräften zusammengedrückt, um durch den Pfad durchzufahren. Eine Kollision mit den Hinderniskanten wird verhindert (die Fahrzeuge werden als Punktoobjekte in der Mitte des Kreuzes angenommen, so dass es auch auf Abbildung 4-34 nicht zum Zusammenstoß kommt). Nachdem die Passage verlassen wurde, breitet das Team sich wieder aus und nimmt seine ursprüngliche Formation ein.

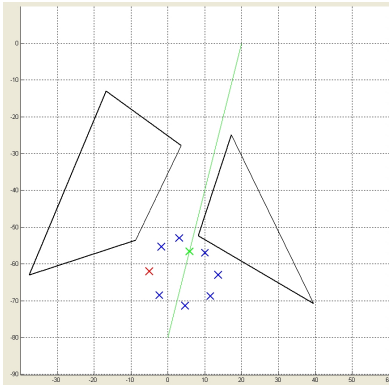


Abbildung 4-33: Acht Fahrzeuge nähern sich einem schmalen Durchgang

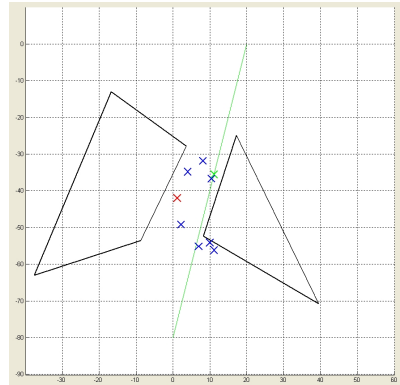
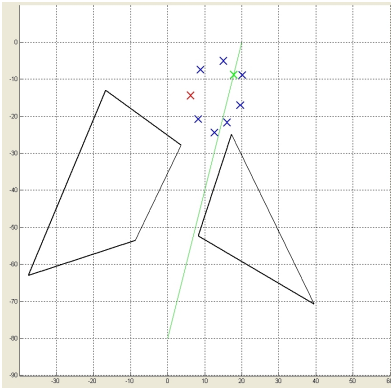
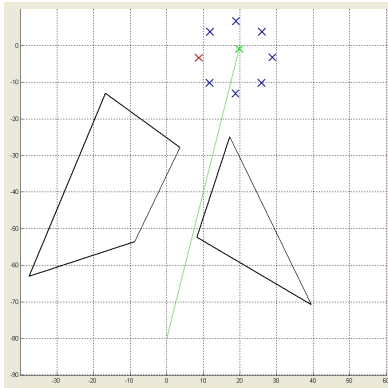


Abbildung 4-34: Die Formation wird entsprechend angepasst

In Abbildung 4-34 ist einer der kritischen Zeitpunkte der Simulation zu sehen. Die drei Fahrzeuge, welche am weitesten hinter den *Virtual Leader* zurückgefallen sind, schaffen es nur sehr langsam, das Hindernis zu passieren. Das Hindernis drückt sie stark in negative y-Richtung und nur sehr leicht in negative x-Richtung, während die (B)-Kräfte sie in positive y-Richtung drückt und bei weiterer Bewegung des *Virtual Leader* auch leicht in positive x-Richtung. Die Kraftanteile in y-Richtung heben sich dabei gegenwärtig auf; je näher das Fahrzeug dem Hindernis kommt, umso höher wird die abstoßende Kraft. Dabei bleibt aber als Resultierende nur eine sehr kleine Kraft in negativer x-Richtung, welche das notwendige Umfahren der entsprechenden Hindernisecke deutlich in die Länge zieht.



**Abbildung 4-35: Nach dem Durchqueren
der Passage breiten die Fahrzeuge sich
wieder aus**



**Abbildung 4-36: Die Formation ist wie-
derhergestellt**

In einer zweiten Testsimulation, welche in Abbildung 4-37 bis Abbildung 4-40 dargestellt ist, befindet sich ein kleines, leicht drachenförmiges Hindernis genau im Bewegungspfad. Während der *Virtual Leader* wiederum einfach passiert, teilt sich das Team auf, um das Hindernis zu umfahren, und findet dahinter wieder zu einer geschlossenen Formation zusammen. Auch an dieser Stelle wird wieder die besondere Schwierigkeit deutlich, den unteren Teil zu umfahren, so dass die vier Fahrzeuge, die diesen Weg wählten, ebenfalls mehr Zeit benötigen. Die Schwierigkeiten sind analog zu denen, welche für das erste Beispiel beschrieben wurden.

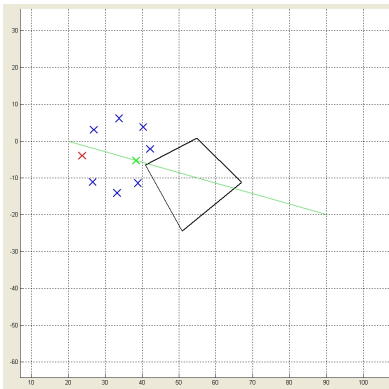


Abbildung 4-37: Acht Fahrzeuge nähern sich einem Hindernis in ihrem Weg

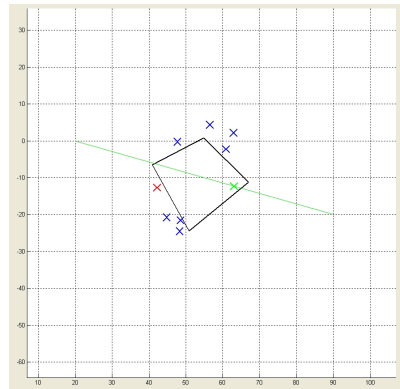


Abbildung 4-38: Die Fahrzeuge haben sich aufgeteilt und umfahren das Hindernis beidseitig

Bereits in den beiden vorgestellten Beispielen wurden die Schwierigkeiten deutlich, welche zu ernsthaften Problemen führen können. In Hindernisnähe können immens große (C)-Kräfte wirken, wenn die Fahrzeuge ausreichend nahe herankommen; außerdem kann sich der *Virtual Leader* sehr weit entfernen, was zu ebenfalls hohen (B)-Kräften führt. Dabei können selbst zwei benachbarte Fahrzeuge trotz (A)-Kräfte gefährlich nahe aneinander heranrücken.

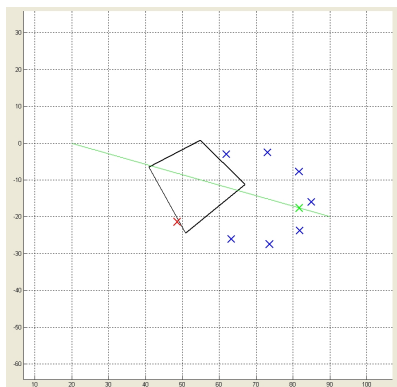


Abbildung 4-39: Hinter dem Hindernis kommen die Fahrzeuge wieder zusammen

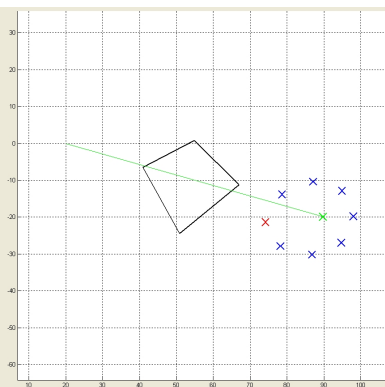


Abbildung 4-40: Die Formation wird wieder hergestellt

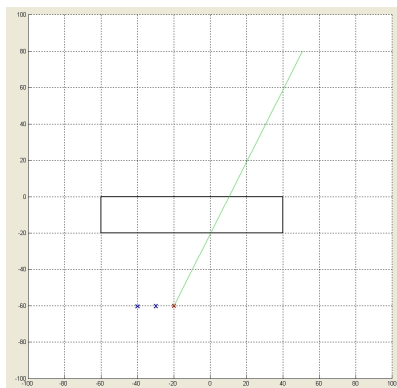


Abbildung 4-41: Drei Systeme in Reihensformation und der geplante Kurs für den *Virtual Leader*

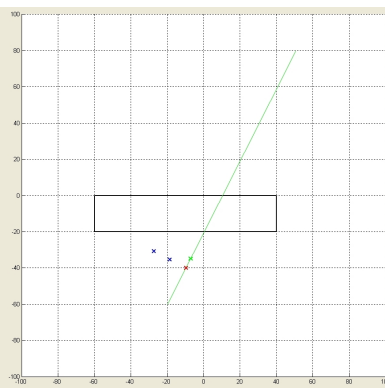


Abbildung 4-42: Nach Formationsherstellung folgen die Fahrzeuge dem *Virtual Leader*

Als weiteres Beispiel wird dieselbe Situation betrachtet, wie sie in Kapitel 5.1 als Simulation von drei MauSI-Systemen mit dem in Kapitel 4.3 beschriebenen

Realisierungen gelöst wird. Drei Systeme sollen hier in Reihenformation ein Ziel auf der anderen Seite des Missionsgebiets erreichen (Abbildung 4-41).

Nach der Start der Mission wird die geforderte Formation hergestellt, und die Systeme folgen dem *Virtual Leader* (Abbildung 4-42). Nach Erreichen der Hinderniswand können die Fahrzeuge dem *Virtual Leader* nicht weiter folgen; es kommt zu einem Ringen zwischen (B)-und (C)-Kräften, während die (A)-Kräfte zumindest den geforderten Abstand zwischen den Fahrzeugen aufrechterhält (Abbildung 4-43). Tatsächlich bewegen sich die Fahrzeuge langsam in positive x-Richtung, da auch der Pfad des *Virtual Leader* einen solchen Anteil enthält. Wäre das Hindernis schmaler, könnte eine Umfahrung gelingen. So aber nehmen die (B)-Kräfte durch die Wegbewegung des *Virtual Leader* ständig zu. Schließlich kommt es auch zu Kollisionen von Fahrzeugen mit der Hinderniswand. Zwar wird die abstoßende Hinderniskraft theoretisch zum Zeitpunkt der Berührung unendlich groß, jedoch kann es aufgrund der zeitdiskreten Realisierung dennoch zur Berührung (und im Falle der Simulation damit natürlich zum Überschreiten) der Hinderniskante kommen. Wurde ein Fahrzeug durch eine hohe abstoßende Kraft in einem Simulationsschritt weggedrückt, so befindet es sich im nächsten bereits weiter weg, und die abstoßende Kraft wird kleiner. Ist der *Virtual Leader* weit genug entfernt, so erzeugt er eine so große Kraft, dass das Fahrzeug enorm in Richtung Hindernis beschleunigt wird. Die entsprechend größer werdende abstoßende Hinderniskraft wird jedoch erst im darauf folgenden Simulationsschritt berechnet; da hat das Fahrzeug aber möglicherweise bereits die Kante passiert. In der Situation in Abbildung 4-43 schwingen die Fahrzeuge tatsächlich ständig vor der Kante vor und zurück, bis es den ersten Systemen gelingt, die Kante zu überschreiten (Abbildung 4-44). Ein entsprechendes Verhalten kann auch in realen Systemen erwartet werden, wo ebenfalls eine zeitdiskrete Realisierung zum Einsatz käme.

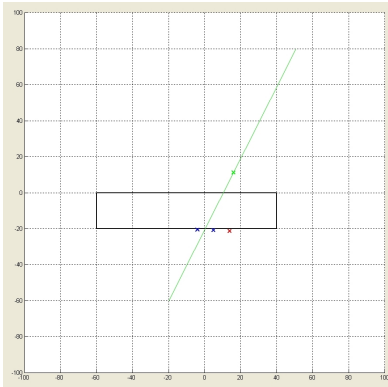


Abbildung 4-43: Die Systeme schmiegen sich an die Hinderniswand an. Es gibt keine Kraft, welche sie um das Objekt herum bewegen könnte.

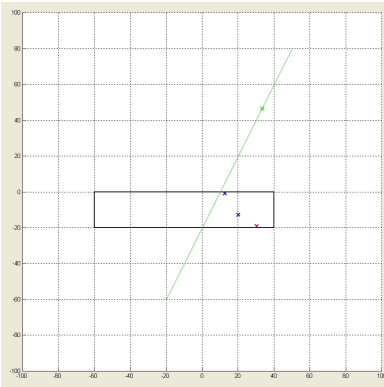


Abbildung 4-44: Die anziehende Kraft zum *Virtual Leader* wird so groß, dass die Fahrzeuge ins Hindernis eindringen

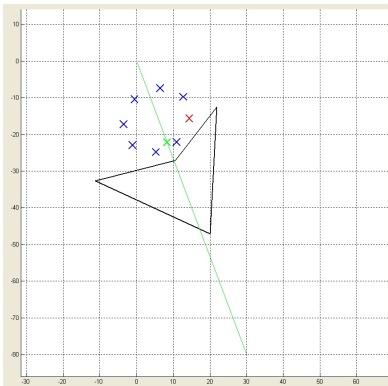


Abbildung 4-45: Acht Fahrzeuge nähern sich einem konkaven viereckigen Hindernis

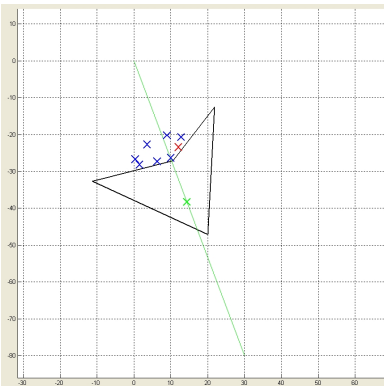


Abbildung 4-46: Die Formation wird zusammengedrückt, findet aber keinen Ausweg

In [ES05] werden die Hindernisse als konvexe Polygone angegeben. Tatsächlich ist der Algorithmus nicht für konkave Hindernisse geeignet. Dies ist in Abbildung 4-45 bis Abbildung 4-48 dargestellt.

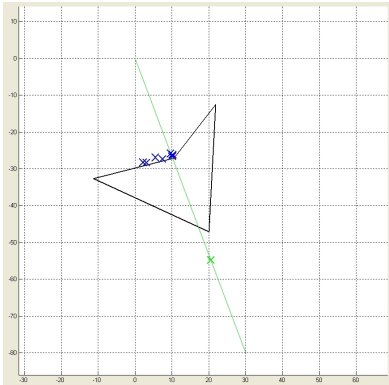


Abbildung 4-47: Der voranschreitende *Virtual Leader* lässt die Fahrzeuge immer näher ans Hindernis rücken; es kommt zu Kollisionen untereinander

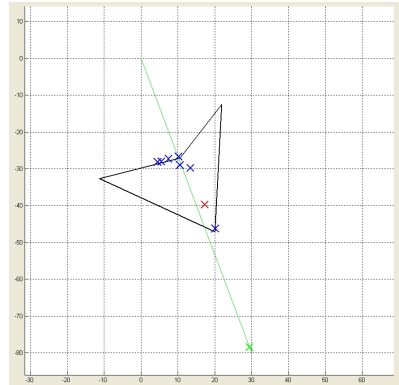


Abbildung 4-48: Die anziehende Kraft zum *Virtual Leader* wird so groß, dass die ersten Fahrzeuge ins Hindernis eindringen

Wie ersichtlich wird, sind die beiden Hinderniskanten am überspitzten Innenwinkel nicht zu überwinden. Ihre abstoßenden Kräfte drängen die Fahrzeuge weg vom *Virtual Leader* und hin zum Hindernispunkt ohne Fluchtmöglichkeiten. Die (A)-Kräfte können noch eine Zeit lang eine zwar eingedrückte, aber noch einigermaßen intakte Formation aufrechterhalten, aber schließlich wird die (B)-Kraft so groß, dass alle Fahrzeuge an die Hinderniskanten gedrückt werden, wo es im folgenden zu einem Ringen zwischen (B)-und (C)-Kräften kommt. Spätestens zu diesem Zeitpunkt erfolgen Kollisionen der Fahrzeuge untereinander, bis wiederum die Fahrzeuge in der Simulation in das Hindernis eindringen.

Zwar könnte die Gefahr des Zusammenstoßes mit dem Hindernis verkleinert werden, indem der zulässige Abstand zwischen *Virtual Leader* und den Einzelsystemen beschränkt wird, doch bliebe dann immer noch das Versagen der Fahrzeuge bestehen, welche die Hindernisse nicht überwinden können. Es muss also festgestellt werden, dass der Algorithmus für ausgewählte Hindernisgruppen keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt.

4.5.3 Zusammenfassende Wertung

Der vorgestellte Ansatz basierte auf einer analytischen Darstellung eines Fahrzeugteams als Flüssigkeitstropfen im Einfluss von Oberflächenspannung und Schwerkraft. Im Rahmen des vorgestellten Konzeptes der Adaptiven Autonomie bleiben die Fahrzeuge in einem hohen autonomen Status, da unter ihnen nur die Positionen von jeweils zwei Nachbarn durch Kommunikation bekannt gemacht werden müssen. Daher ist der Autonomiegrad etwas geringer als bei den Systemen in Kapitel 4.4, welche nicht zur direkten Kommunikation befähigt waren. Dafür wird nun auf jegliches stochastisches Konzept verzichtet. Die Anforderungen an die hinderniserkennende Sensorik sind höher, und an die Aktorik der Fahrzeuge werden hohe Anforderungen gestellt. Aufgrund einer fehlenden zentralisierten Hierarchie kann es bei diesem Ansatz immer wieder zu Kollisionen kommen.

Die Funktion dieses Ansatzes konnte im Prinzip nachgewiesen werden. Der Ansatz ist jedoch nur bedingt geeignet, Wege durch Hindernislandschaften zu finden. Zur Erkundung von unbekannten Gebieten, wie in dieser Arbeit betrachtet, muss der Ansatz als nicht geeignet betrachtet werden. Wie aufgezeigt wurde, können bereits einfache, rechteckige Hindernisse die Mission scheitern lassen. Entsprechend wäre auch eine Flucht aus einem Raum, wie für einzelne MauSI-Roboter in Kapitel 4.2.2 demonstriert, mit diesem analytischen Ansatz nicht zu schaffen. Eine sichere Missionsausführung wäre nur möglich, wenn

bereits a priori Wissen über das Einsatzgebiet besteht und der Pfad des *Virtual Leader* entsprechend geplant wird, dass er möglichst um Hindernisse herumführt, Passagen selbständig entdeckt und konkaven Hindernissen völlig aus dem Weg geht. Eine solche Wegsuche in vollständig aufgeklärtem Gebiet kann auch automatisiert werden. Dazu wurden an der Technischen Universität Ilmenau ebenfalls Arbeiten unter Mitarbeit des Autors ausgeführt, etwa in [Pre03]. Eine Kombination aus diesen Ansätzen und dem aus der Literatur übernommenen Algorithmus könnte vielversprechende Resultate liefern, jedoch nur bei bekannter Hinderniskonstellatation und somit außerhalb der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Aufgabenstellung.

4.6 Zusammenfassung und Wertung der unterschiedlichen Konzepte

Im Rahmen der Forschungstätigkeiten des Autoren an der Technischen Universität Ilmenau und dem Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik Ilmenau wurden auf verschiedene Arten Teams aus mobilen Systemen in Simulationen in virtuellen Welten umgesetzt sowie unter Verwendung unterschiedlicher Konzepte gesteuert. Ein weiteres Konzept wurde aus einer Veröffentlichung übernommen und vergleichend getestet. Alle verschiedenen Konzepte lassen sich im Konzept der Bioorientierten Adaptiven Autonomie gemäß den Ausführungen in Kapitel 3 gut einordnen. Vorgehensweise und Resultate sollen nun nochmals kurz zusammengefasst werden. Ausgangsszenario war die Zielfindung eines Teams in einem Gebiet mit unbekannten Hindernissen.

In den Kapiteln 4.1 bis 4.3 wurde die Realisierung von kleinen Gruppen mobiler Systeme vorgestellt. Dabei wurde jedes Fahrzeug analytisch beschrieben. Steuerungskonzepte für die Autonomie des einzelnen Systems sowie für die

gesamte Gruppe wurden unter Verwendung von regel- bzw. grafenbasierten Methoden vorgestellt und simulativ validiert. Die Vorgehensweise führte zu hierarchisch aufgebauten Steuersystemen, sowohl für das einzelne System, als auch für die Gruppe. Es wurde deutlich, dass zunächst die Autonomie des einzelnen Systems erreicht werden musste (hoher Autonomiegrad). Damit wurde es möglich, im Verbund die Systeme kooperieren zu lassen, indem ihre Autonomiegrade abgesenkt wurden. Dies erhöhte den Autonomiegrad der Teaminstanz. In bestimmten Situationen, etwa dem Ausweichen eines Hindernisses, wurden die Autonomiegrade an die Situation adaptiert und damit die bestehende Hierarchie verändert. Dabei wurde eine Lösung für das zuvor in Kapitel 2.4 beschriebene Problem „Autonomie des Einzelnen vs. Kooperation in der Gruppe“ aufgezeigt. Wesentliche Voraussetzungen für die Realisierung dieses Konzeptes wurden dargelegt. Die einzelnen Systeme müssen ständig untereinander Informationen austauschen können. Außerdem ist eine möglichst genaue Positionsbestimmung erforderlich. Die Umsetzung der angewendeten Steuerungskonzepte erfordert des Weiteren eine entsprechend leistungsfähige Rechenhardware. Prinzipiell müssen also mobile Systeme von relativ hohem technischem Stand zum Einsatz kommen, um Missionen in kleinen, hierarchisch aufgebauten Verbänden erfolgreich durchführen zu können. Aus der Biologie bietet sich die Bezeichnung „Rudel“ für einen solchen Teamtypen an. Ein mögliches Konzept ist in Abbildung 4-49 dargestellt. Gemäß den Ausführungen wird im Rahmen dieser Arbeit folgende Definition vorgeschlagen:

Definition 4.1: Rudel

Ein Rudel ist ein Team aus mehreren (eher weniger vielen) mobilen Systemen mit hohen technischen Fähigkeiten, besonders im Bereich der Kommunikation. Die Führungsstrategie zur Erlangung von Kooperation ist nach einer an die Situation adaptierbaren, aber zu jedem Zeitpunkt klar definierten Hierar-

chie aufgebaut. Die mobilen Systeme können in Zusammenarbeit ihren Autonomiegrad weit absenken, was zu einer hochautonomen Teaminstanz führt.

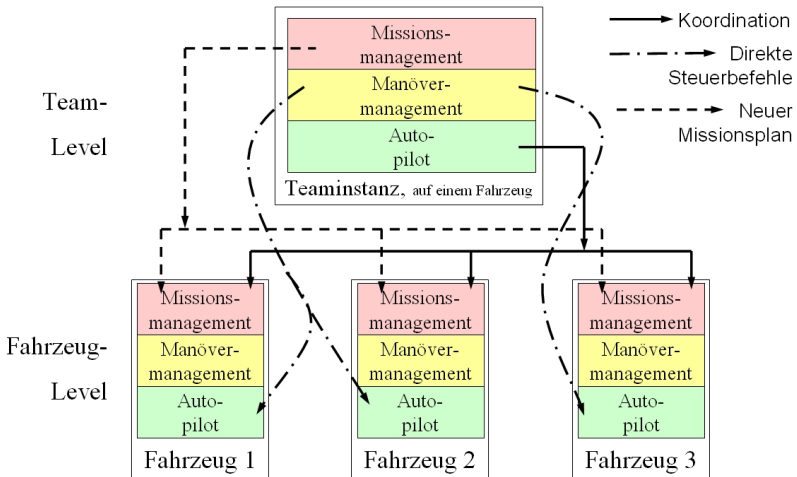


Abbildung 4-49: Ein hierarchisch aufgebautes Rudel aus Fahrzeugen

Der Einsatz von mobilen Systemen mit geringeren Fähigkeiten, gerade im Bereich der Kommunikation, wurde untersucht und die Resultate im Kapitel 4.4 beschrieben. Vorlage waren dabei Ameisenschwärme aufgrund der großen Analogie zur beschriebenen Situation. Auch Ähnlichkeiten zur Agententechnologie (z.B. [Wei99]) zeigen sich. Die simulierten Systeme waren nicht zu direkter Kommunikation befähigt, teilweise war nicht einmal eine globale Positionsbestimmung vorgesehen. Außerdem wurden bei den Steuerungskonzepten der einzelnen Systeme auf komplizierte Verfahren verzichtet. Es erfolgte keine analytische Beschreibung der einzelnen Systeme, um den Rechenaufwand gering zu halten. Im Verbund kamen Evolutionsstrategie-ähnliche Ansätze zur Verwendung, welche sich grob unter den Stichworten „Testen und Belohnen bzw. Bestrafen“ zusammenfassen lassen. Deutlich konnte aufgezeigt werden, dass auf diese Weise auch Kooperation zustande kam. Allerdings

behielten die einzelnen Systeme stets einen hohen Autonomiegrad, während der Autonomiegrad der Gruppeninstanz niedrig blieb. Daher lässt sich eher von einem dezentralen Ansatz sprechen, auch wenn in einigen Umsetzungen eine zentrale Intelligenz vorhanden war. Ein zuverlässiges Erfüllen der gestellten Aufgaben war generell nur durch den Einsatz entsprechend großer Mengen mobiler Systeme möglich, wobei eine Erhöhung der Anzahl der mobilen Systeme nur bis zu einem bestimmten Punkt die Effizienz des gesamten Verbandes erhöht. Die Bezeichnung „Schwarm“ wird als Beschreibung eines Verbandes mit diesen Eigenschaften vorgeschlagen:

Definition 4.2: Schwarm

Ein Schwarm ist ein Team aus einer hohen Zahl mobiler Systeme von eher niedrigeren Fähigkeiten, besonders im Bereich der Kommunikation. Evolutionäre, stochastikorientierte Führungsstrategien führen zu einem dezentralen Verhalten. Die Systeme operieren mit hohem Autonomiegrad, wohingegen jener der Teaminstanz klein bleibt.

In Abbildung 4-50 ist eine mögliche Umsetzung eines Fahrzeugschwarmes konzeptionell angedeutet. Dabei wurde die Autonomie der Einzelfahrzeuge hierarchisch vorgenommen, worauf die Elemente des Rational-Behaviour-Models (s. Kapitel 2.2.4) hindeuten. In realen Umsetzungen mit vielen Fahrzeugen mit geringen technischen Leveln wäre, wie in den Beispielen aufgeführt, eine einfachere Realisierung des Einzel-Autonomiekonzeptes wahrscheinlicher.

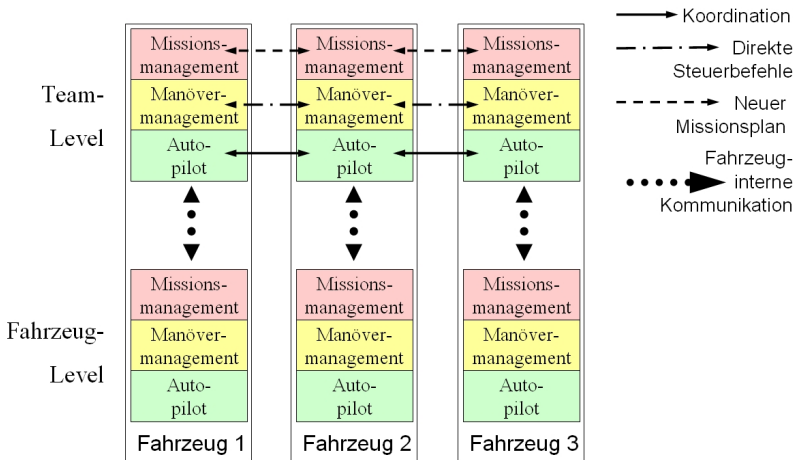


Abbildung 4-50: Ein dezentraler Fahrzeugschwarm

Die Aufspaltung des Begriffes Team in Rudel und Schwarm ist grafisch in Abbildung 4-51 dargestellt. Diese Trennung wurde vom Autor in [GW06] vorgeschlagen.

Ähnlich konnte auch ein aus der Literatur übernommener Ansatz umgesetzt und eingeordnet werden. Bei diesem ist das Steuerungskonzept ausschließlich analytisch umgesetzt, die Fahrzeuge operierten jedoch in einem geringeren Einzelautonomegrad als bei den in Kapitel 4.4 vorgestellten Lösungen. Dabei wurde auf stochastische Strategien verzichtet. Diese Lösung ist also zwischen den aufgezeigten Randbegriffen „Rudel“ und „Schwarm“ angesiedelt, inhaltlich sicherlich dem Schwarm näher. Es wird deutlich, dass auch bei der Beurteilung der Teamstrategien – genau wie beim Konzept der adaptiven Autonomie – keine eindeutige Zuordnung zu einer eindeutigen, starren Definition möglich ist, sondern dass sich unterschiedliche Strategien im Gesamtspektrum zwischen streng hierarchisch und vollkommen dezentral bewegen. Dabei werden verschiedene Parameter – wie Fahrzeuganzahl und Autonomielevel der Einzelsysteme – eine Zuordnung ermöglichen. Die Begriffe „Rudel“ und „Schwarm“ können als Richtwerte dienen.

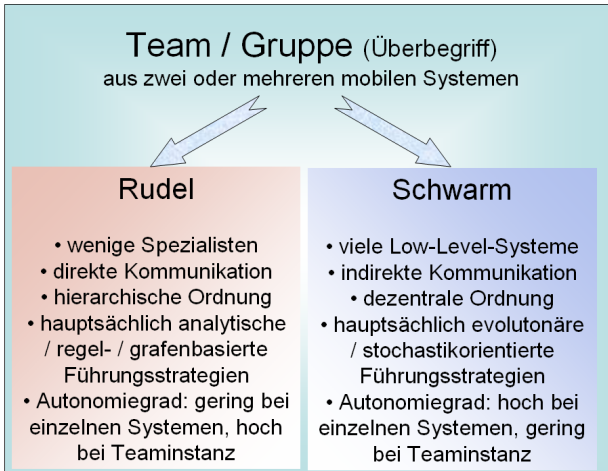


Abbildung 4-51: Unterscheidung zwischen Rudel und Schwarm

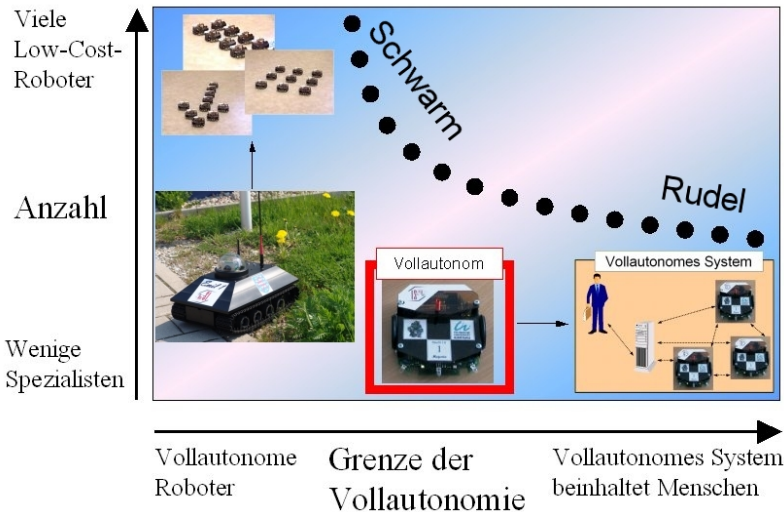


Abbildung 4-52: Autonomiegrade der Teammitglieder in Abhängigkeit der Roboterarten

Abbildung 4-52 stellt das gesamte Spektrum der Teamstrategien noch einmal grafisch dar. Dabei wird – analog zum Konzept der adaptiven Autonomie – keine scharfe Trennung zwischen Rudel und Schwarm vorgenommen. Beide Arten lassen sich an den Rändern des Gesamtspektrums möglicher Umsetzungen finden. Die Abszisse der Abbildung zeigt die Anzahl der zum Einsatz kommenden Systeme zur Bewältigung einer bestimmten Aufgabe. Dabei kann, wie beschrieben, davon ausgegangen werden, dass der technische Stand umso höher ausfallen muss, desto weniger Systeme (als Spezialisten bezeichnet) zum Einsatz kommen. Die zugehörigen kleinen Bilder stellen dies ebenfalls dar: viele kleinere Systeme oder verhältnismäßig weniger Systeme mit mehr Fähigkeiten. Die Ordinate zeigt die Grenze der möglichen Autonomiegradabsenkung des Einzelsystems bei der Realisierung des kooperativen Verhaltens (wobei eine Autonomiegradabsenkung der einzelnen Systeme gleichzeitig eine Autonomiegraderhöhung der Verbundinstanz mit sich bringt). Das bedeutet, jedes System kann seinen Autonomiegrad zugunsten einer Teaminstanz umso weiter absenken, je weiter rechts es sich auf der Ordinate befindet. Die beiden kleineren Bilder unterstützen diese Aussage: Ein System ganz links kann seinen Autonomiegrad fast gar nicht absenken, weshalb es hochautonom bleibt und kaum kooperieren kann. Rechts können die Einzelsysteme ihre Autonomiegrade so weit absenken, dass auch die Zentralsteuerung und der Mensch mit zum „vollautonomen (Gesamt-)System“ gezählt werden können, d.h. es wird eine umfassende Kooperation erreicht.

Die gepunktete Linie in Abbildung 4-52 gibt den tendenziellen Verlauf des Zusammenhanges zwischen Ordinate und Abszisse wieder: Ist die Autonomiegrad der Einzelsysteme weniger abzusenken, kommt nur eine schlechtere Kooperation zu Stande. Meistens werden dann auch mehr Systeme benötigt. Dies stellt die Linie im linken oberen Teil dar (Schwarm). Wenige, technisch besser ausgerüstete Systeme können ihren Autonomiegrad eher weiter absenken und damit eine bessere Kooperation erreichen. Dies deutet die gepunktete Linie im rechten Teil der Abbildung an (Rudel). Die Erkenntnis, dass Systeme

mit geringerem technischen Stand zu höheren Autonomiegraden neigen, mag überraschen (s. auch ähnliche Erkenntnisse bei Einzelsystemen in Kapitel 3.2), wird jedoch verständlich, wenn man sich klar macht, dass Autonomiegrade der Einzelsysteme und der Teaminstanz gegenläufig zueinander stehen. Das Konzept der Adaptiven Autonomie löst den aufgezeigten Widerspruch zwischen Kooperation und Selbständigkeit durch Einführung der Teaminstanz. Außerdem lässt sich die Anforderung ableiten, dass – unabhängig vom angestrebten Teamtyp – zunächst eine Realisierung von einzelnen teilautonomen Fahrzeugen nach dem Konzept der adaptiven Autonomie sinnvoll ist.

Soll eine Empfehlung abgegeben werden, welcher Verbundtyp für die Umsetzung realer Gruppen aus mobilen Systemen am ehesten geeignet erscheint, ist ein Rückblick auf die vorhandenen Arten von mobilen Systemen und möglichen Aufgaben sinnvoll, welche in Kapitel 2 vorgestellt wurden. Prinzipiell erscheint dem Autor eine Tendenz in Richtung rudelorientierten Verbund sinnvoller. In Schwärmen war prinzipiell eine hohe Anzahl an Gruppenmitgliedern zur Erfüllung einer Aufgabe notwendig. Wenn durch finanzielle Einschränkungen der Einsatz einer großen Zahl der Systeme nicht möglich ist, kann ein Schwarm kaum noch umgesetzt werden. Des Weiteren bereitet das oftmals auf stochastischen Grundlagen beruhende Verhalten der einzelnen Systeme in einem Schwarm Schwierigkeiten. Bei teilweise sehr großen, schweren mobilen Systemen, die mit entsprechenden Geschwindigkeiten operieren und dabei ein großes Gefahrenpotential darstellen, erscheint die Verwendung stochastischer Methoden zur Verhaltensermittlung sowohl aus technischer als auch aus juristischer Sicht hochproblematisch. Auch müssen die Konsequenzen bedacht werden, welche sich aus den evolutionären Konzepten ergeben. Die mobilen Systeme in Schwärmen lernen aus Fehlern; dabei will man jedoch Fehler eigentlich unbedingt vermeiden. In den Simulationen, auf die in den Kapiteln 4.4 hingewiesen wurde, kam es immer wieder zu kritischem Verhalten einzelner Systeme, welche an Hindernissen oder Wänden stehen blieben oder

einen offensichtlich, bei Anwendung einfacher Trigonometrie leicht als solchen zu identifizierenden Irrweg einschlagen und dabei teilweise andere Schwarmmitglieder blockierten. In Simulationen entsteht dadurch kein Problem. Entsprechende Blockaden können erkannt und durch Elimination der beteiligten Systeme behoben werden. In der Realität ist diese Vorgehensweise kaum denkbar. Außerdem muss bei realen Anwendungen – wiederum unter den Gesichtspunkten Kosten und juristischen Aspekten – der Verlust einzelner Systeme, welcher in den simulierten Schwarmsituationen vorkommt und hingenommen wird, verhindert werden.

Es erscheint also eine hierarchische Gruppenstruktur mit klar definierten Verantwortungen und Fähigkeiten sowie deren Umsetzung über analytische, regel- oder grafenbasierte Verfahren am sinnvollsten. Auf diesem Weg ist das Verhalten der mobilen Systeme am ehesten kontrollier- und vorhersagbar. Fehler können leicht rekonstruiert, verfolgt und behoben werden. Verantwortungen im Fehlerfall lassen sich leichter bestimmen. Eine hohe Dynamik in der Gruppenhierarchie mit der Fähigkeit, auf aktuelle Situationen und Aufgaben immer wieder neu und optimal angepasst reagieren zu können, bringt das Konzept der Adaptiven Autonomie mit sich. Bei nicht vorhandenen oder schlechten Kommunikationsmöglichkeiten, etwa im Unterwasserbereich, muss nach Erweiterungen in den Konzepten gesucht werden. In diesen Fällen wird ein Betreiben der einzelnen Systeme in höheren Autonomiegraden unumgänglich sein. Doch sollten auch bei diesen Situationen klare Hierarchien für transparentes Verhalten sorgen. Des Weiteren können gerade in diesem Fall Ideen aus der schwarmbasierten Umsetzung übernommen und adaptiert werden. Die unscharfe Definition des Spektrums an Teamstrategien bietet – genau wie die adaptive Autonomie – ein breites Feld, um abhängig von der Aufgabe den optimalen Weg zu finden. Es ist an dieser Stelle noch viel Bedarf an Forschung vorhanden.

Die Bevorzugung von rudelorientierten Verbundkonzepten vor den schwarmorientierten basiert also im Wesentlichen auf den realen Anforderungen, wel-

che sich in der unmittelbaren Zukunft stellen, und auf den Entwicklungen, welche in kürzerer Zeit realistisch scheinen. Es soll keinesfalls die Verwendung schwarmbasierter Konzepte im Bereich der mobilen Systeme grundlegend ausgeschlossen werden. Mögliche Szenarien könnten dabei Einsätze von sehr kleinen Systemen in großen Mengen sein, welche ähnlich wie in Kapitel 4.4 beschrieben optimale Wegsuchen/ Erkundungen in unbekannten Gebieten vornehmen könnten. Diese werden in der Entwicklung aufgrund von notwendigen Miniaturisierungen zunächst relativ teuer sein, könnten aber später in Massenproduktionen kostengünstig gefertigt werden. Eine geringe Größe verringert das Gefahrenpotential, so dass Steuerungskonzepte auf stochastischer Basis dann denkbar wären. Auch Einsatzszenarien in Gebieten ohne Gefährdung für den Menschen, möglicherweise in unbemannten Weltraum- oder Unterwasserszenarien, wären denkbar. Deshalb ist eine weitere Vertiefung von schwarmorientierten Fahrzeugteams in Simulationen sinnvoll, auch wenn in kurzfristiger Zeit keine realen Anwendungen möglich erscheinen.

5 Beispiele zur Steuerung von Roboterteams

In diesem Kapitel werden Beispiele zu den zuvor gemachten Ausführungen gegeben, die auf den Arbeiten des Autors beruhen. Zum einfacheren Verständnis sind die Videodateien der Beispiele aus Kapitel 5.1 und 5.2 sowie eine Animation zum Beispiel in Kapitel 5.3 über die Website des Fachbereiches Systemanalyse der Technischen Universität Ilmenau downloadbar [FSA09].

5.1 Beispielmmission eines Roboterrudels auf dem Land

Im Folgenden wird eine Beispielmmission mit drei MauSI-Systemen dargestellt, welche in dem im Rahmen von [Brü02] und [GKW03] entstandenen MAT-LAB / Simulink-Simulationstool durchgeführt und in Virtueller Realität dargestellt wurde. Grundlage sind die Ausführungen in den Kapiteln 4.1 bis 4.3. In Abbildung 5-1 ist der Missionsauftrag dargestellt. Abbildung 5-2 bis Abbildung 5-11 zeigen relevante Szenen aus der Missionsabwicklung. In Tabelle 5-1 auf Seite 169 sind die während der Mission durchgeführten Aktionen, Entscheidungen und Kommunikationsaktivitäten dargestellt. Dabei werden die jeweiligen Instanzen gemäß des Rational Behaviour Models dargestellt, wie es in Kapitel 3.3 beschrieben wurde: Der Mensch übernimmt dabei das Missionsmanagement (Strategische Ebene nach dem RBM), die Zentralsteuerung (ZS) das Manövermanagement (Taktische Ebene) und die Roboter die Funktion des Autopiloten (Ausführende Ebene). Auch dabei kann die Zentralsteuerung auf einem zusätzlichen Rechner, auf einem Roboter oder verteilt auf mehreren

Systemen laufen. In jedem Fall ist sie für die Ausführung des höhergestellten Fuzzy-Systems zuständig.

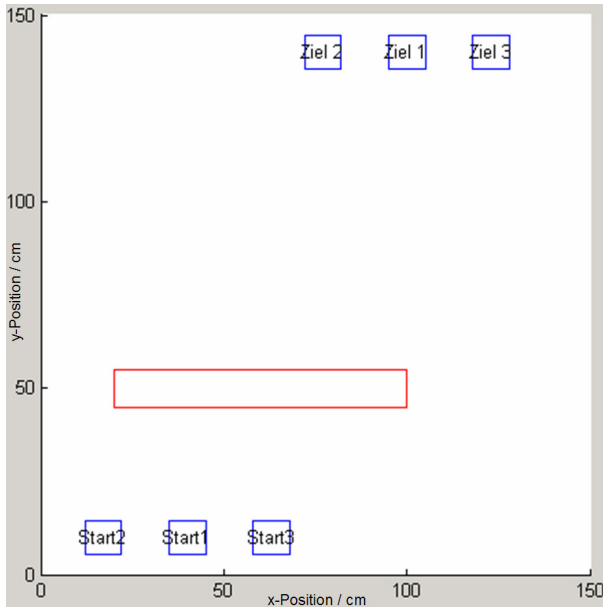


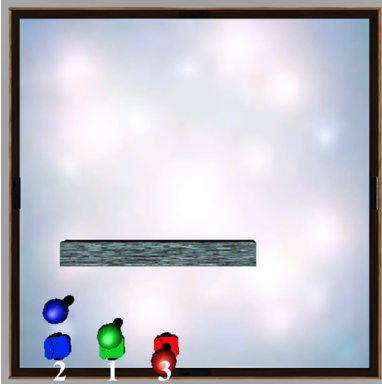
Abbildung 5-1: Missionsauftrag

Ziel ist es, drei MauSI-Systeme von ihrer Startposition in der unteren linken Ecke zu den Zielpositionen in der gegenüberliegenden Ecke zu bewegen. Die Systeme sollen sich dabei in einer Reihe bewegen, wie es bei Suchmissionen üblich sein könnte. Gemäß der Darstellung in Abbildung 5-1 befindet sich im Missionsgebiet ein längliches Hindernis, welches vor Missionsbeginn nicht bekannt ist. Es ist vorgegeben, dass Hindernisse nacheinander in Linienformation passiert werden sollen, da auf diese Weise am ehesten Engstellen passiert werden können. Die Roboter sind von eins bis drei durchnummeriert, wobei die Startaufstellung von links nach rechts nach Abbildung 5-1 in der Reihenfolge

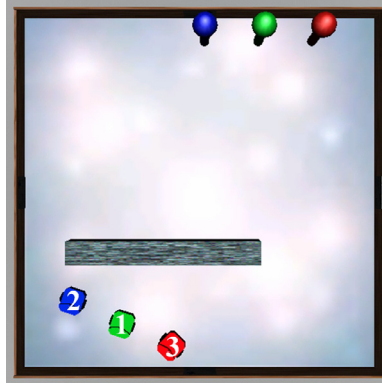
„2-1-3“ oder nach Farben gemäß Abbildung 5-2 „blau 2 – grün 1 – rot 3“ geschieht. Diese Nummerierung sagt dabei nichts über die Hierarchie im Team aus, welche prinzipiell verändert werden kann, wie im Laufe der Mission gezeigt werden wird.

Gemäß Tabelle 5-1 beginnt die Mission mit dem Erteilen des Auftrages (Missionsplanung) durch den Menschen. Die Zentralsteuerung stellt zunächst fest, dass die Formation gegenwärtig nach der Initialisierung gemäß Abbildung 5-1 nicht in Ordnung ist. Im höhergestellten Fuzzy-System wird daher nach dem Zustandsgraf aus Abbildung 4-21 auf Seite 110 aus dem Zustand „Missionsbeginn“ nach „Formationsherstellung“ geschaltet. Das Kontrollsystem berechnet virtuelle Ziele zweiter Ordnung. Diese liegen auf einer Linie, welche orthogonal zur Zielrichtung liegt. Die Linie wird dabei so gelegt, dass einer der Roboter sich nicht und die anderen nur vorwärts bewegen müssen. Damit ergibt sich im beschriebenen Fall eine Konstellation, die in Abbildung 5-2 dargestellt ist. Dabei markieren die dicken Pins die aktuellen virtuellen Ziele zweiter Ordnung. Sie sind farblich entsprechend der jeweiligen Roboter markiert. Nachdem die Roboter ihre Ziele erreicht haben, geben sie eine entsprechende Meldung an die ZS ab, welche nach Herstellung der Formation im Zustandsgraf in den Zustand „Direkte Zielfahrt“ schaltet. Jetzt wird das höhergestellte Kontrollsystem inaktiv, und die realen Ziele werden an die Roboter weitergegeben. Die Systeme nehmen die Anfahrt auf das Ziel auf (Abbildung 5-3). Jedes System bewegt sich mit den im vorherigen Abschnitt vorgestellten Methoden auf sein jeweiliges Ziel zu. Die ZS kontrolliert im Rahmen des höhergestellten Kontrollsystems in regelmäßigen Abständen die Ausrichtungen der Systeme zueinander und schaltet zurück in den Zustand „Formationsherstellung“, wenn ein bestimmter Grenzwert überschritten wird. In diesem Fall werden wieder virtuelle Ziele zweiter Ordnung kreiert, welche den am meisten fortgeschrittenen Roboter stoppen lassen, bis die anderen wieder in die Formationsreihe aufgerückt haben. Die Häufigkeit dieser Korrekturingriffe hängt im

Wesentlichen von der Qualität der einzelnen Robotersteuerungen sowie der Genauigkeit der Roboteraktorik ab.



**Abbildung 5-2: Vorgabe virtueller Ziele
zur Formationsherstellung**



**Abbildung 5-3: Nach Formationsherstellung
wird die Zielfahrt aufgenommen**

Im vorgestellten Szenario wird relativ bald das Hindernis vom linken (blauen) Roboter 2 detektiert, was er an die Zentralsteuerung meldet. Dort wird jetzt in den Zustand „Hindernisvermeidung“ geschaltet. Aus dem Einzel-Steuerkonzept gemäß dem letzten Kapitel ergibt sich im vorliegenden Fall eine bevorzugte Drehrichtung nach rechts, weil der linke Roboter das Hindernis mit seinem vorderen linken Sensor detektierte. Da über die Hindernisausrichtung nichts bekannt ist, gibt es keinen Grund, die andere Drehrichtung zu bevorzugen. Wenn das Team vor dem unbekannten Hindernis nach rechts abdrehen und das Hindernis rechtsherum umfahren werden soll, ist der rechte (rote) Roboter 3 derjenige, welcher bereits am weitesten ist. Aus diesem Grund wird ihm nun die Verantwortung übertragen, einen Weg um das Hindernis zu finden. Dies wird dadurch erreicht, dass ihm weiterhin sein reales Ziel vom höhergestellten Steuersystem übergeben wird. Wie in der Mitte von Tabelle 5-1

dargestellt, erhalten die anderen Systeme die Anweisung, dem roten Roboter 3 zu folgen. Abbildung 5-4 zeigt die Umsetzung dieser Anweisung. Während der rote Roboter 3 noch auf direktem Weg auf sein reales Ziel zusteuert (dicker Pin in der oberen rechten Ecke), dreht der mittlere (grüne) Roboter 1 bereits ab, da er jetzt jeweils den aktuellen Positionswert vom roten Roboter 3 als virtuelles Ziel zweiter Ordnung erhält. Entsprechend verhält es sich mit dem linken (blauen) Roboter 2, welcher die Position des mittleren Roboters 1 als virtuelles Ziel zweiter Ordnung erhält. Dies wird jeweils durch die farbigen Pins im Inneren der anderen beiden Roboter angezeigt. Durch diese Vorgehensweise wird die Formation aufgebaut, welche die Roboter im Gänsemarsch am Hindernis vorbeimarschieren lassen wird. Der Abstand der Roboter voneinander wird dabei vom höhergestellten Steuersystem ständig überwacht: Entfernt sich ein führender Roboter zu weit von seinem Verfolger, wird seine Geschwindigkeit reduziert (bis nötigenfalls zum Stillstand); wird der Abstand zu gering, muss der folgende Roboter seine Geschwindigkeit senken.

Nach dem Konzept der adaptiven Autonomie wurde der Autonomiegrad der Systeme kurzzeitig gesenkt, um ihnen neue Ziele zu geben, und sie operieren durch die Abstandsüberwachung und Geschwindigkeitsanpassung im Folgenden weniger autonom, um die Linienformation aufrecht zu erhalten. Da in der Linienformation höhere Kollisionsgefahr besteht als in der Reihe, ist dieses Operieren im (zunächst) gesenkten Autonomiegrad erforderlich und der Situation angepasst. Durch Erkennen von Hindernissen können die Systeme jetzt jederzeit mit Hilfe ihrer übergeordneten Steuerungssysteme virtuelle Ziele erster Ordnung kreieren, um dem Hindernis auszuweichen; eine erneute Information der ZS ist nicht notwendig. Dieser Umstand erhöht ihren Autonomiegrad im Zustand der „Hindernisvermeidung“, da sie berechtigt sind, selbstständig ihr Ziel zu verlegen. In Abbildung 5-5 ist zu sehen, wie der rechte (rote) Roboter 3 bereits vor dem Hindernis abgedreht hat und in die Wandverfolgung übergeht, gefolgt von seinen beiden Teamkollegen. Auch diese sind in der Lage, selbstständig ihre Fahrtrichtung zu ändern, um mit einem virtuellen

Ziel erster Ordnung dem Hindernis fernzubleiben. Das aktuelle virtuelle Ziel erster Ordnung des rechten (roten) Roboters 3 befindet sich zu diesem Zeitpunkt rechts außerhalb der Einsatzarena. Der dünne Pin markiert sein virtuelles Ziel zweiter Ordnung, welches gegenwärtig mit dem realen Ziel in der oberen rechten Ecke zusammenfällt.

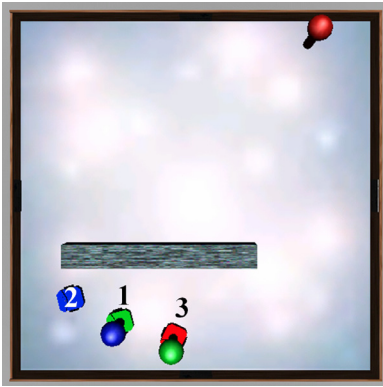


Abbildung 5-4: Nach Hindernisdetektion erfolgt die Formationsumstellung

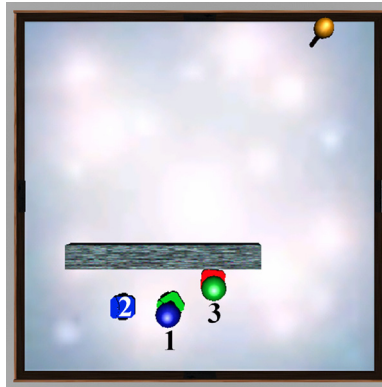


Abbildung 5-5: Der rechte Roboter führt das Team, die anderen Systeme folgen

Wenn der Führungsroboter das Hindernis passiert hat und wieder Fahrt auf sein reales Ziel aufnimmt, kommt es zur nächsten interessanten Situation, welche in Abbildung 5-6 dargestellt ist. Der grüne Roboter 1 hat die Anweisung, dem roten Roboter 3 zu folgen, doch würde ihn der direkte Weg zur Position des Führungsroboters mit dem Hindernis kollidieren lassen. Daher kreiert er ein virtuelles Ziel erster Ordnung (dicker Pin), welches er nach rechts weg vom aktuellen virtuellen Ziel zweiter Ordnung (dünner Pin im Führungsroboter) dreht. Daher gelingt es ihm, das Hindernis zu umfahren, ohne dabei den Kontakt zu seinem Führungsroboter zu verlieren. Dies kann besonders bei komplizierten Hindernisszenarien erforderlich sein.

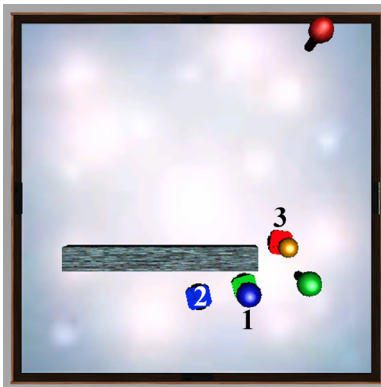


Abbildung 5-6: Selbständiges Hindernisausweichen der Folgefahrzeuge I

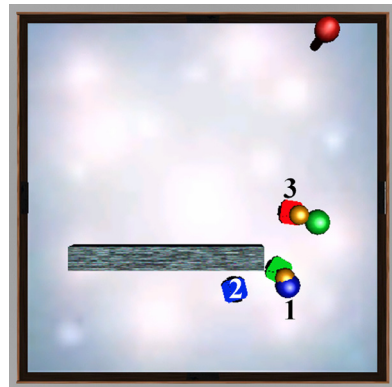


Abbildung 5-7: Selbständiges Hindernisausweichen der Folgefahrzeuge II

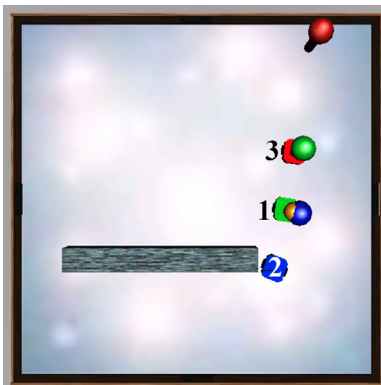


Abbildung 5-8: Selbständiges Hindernisausweichen der Folgefahrzeuge III

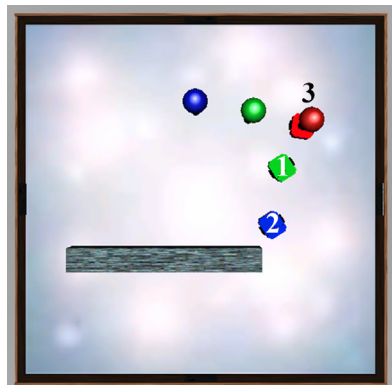


Abbildung 5-9: Nach Umfahrung des Hindernisses wird die alte Formation wiederhergestellt

In Abbildung 5-7 hat der grüne Roboter 1 das Hindernis umfahren und verlegt gerade sein virtuelles Ziel zweiter Ordnung zurück in Richtung virtuelles Ziel erster Ordnung im Führungsroboter. Gleichzeitig gerät der blaue Roboter 2 jetzt in eine vergleichbare Situation, welche er ebenfalls durch das Kreieren

eines virtuellen Zieles erster Ordnung in selber Weise behebt. Auf diese Weise gelingt es schließlich allen drei Systemen, das Hindernis zu umfahren. In Abbildung 5-8 ist dargestellt, wie die drei Systeme wieder in Linienformation Fahrt in Richtung reales Ziel aufnehmen, nachdem auch das hintere System sein virtuelles Ziel erster Ordnung allmählich wieder in sein virtuelles Ziel zweiter Ordnung und damit auf die Position des vor ihm fahrenden Roboters verlegt hat.

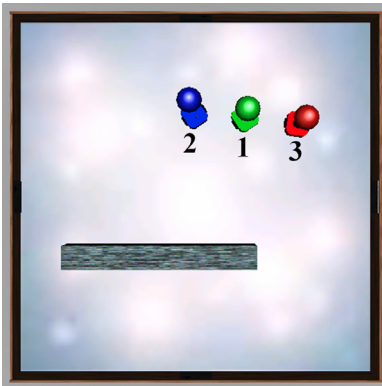


Abbildung 5-10: Die Wiederherstellung der Formation ist abgeschlossen



Abbildung 5-11: In der geforderten Formation wird die Zielfahrt fortgesetzt und abgeschlossen

Nachdem keiner der drei Roboter mehr ein Hindernis wahrnimmt, schaltet die ZS im Zustandsgrafen in den Zustand „Formation herstellen“ um, was in Abbildung 5-9 dargestellt ist. Erneut berechnet die ZS die Sollpositionen so, dass einer der Roboter direkt stehen bleiben kann und die anderen sich nach Möglichkeit nur vorwärts bewegen müssen, wie es durch die dicken Pins dar-

Tabelle 5-1: Vorgänge während der Missionsausführung

Akteur	Aktion	Instanz
Mensch an ZS	"Verlege Roboterteam zu definiertem Zielpunkt in Reihenformation!"	Missionsmanagement
ZS (intern)	Formation nicht OK	Manövermanagement
ZS an Team	"Formation einnehmen!"	Manövermanagement
Grün 1, Blau 2, Rot 3	Neue Ziele erhalten	Autopilot
Rot 3 an ZS	"Ziel erreicht!"	Autopilot
Grün 1 an ZS	"Ziel erreicht!"	Autopilot
Blau 2 an ZS	"Ziel erreicht!"	Autopilot
ZS (intern)	Formation OK	Manövermanagement
ZS an Team	"Ziel anfahren!"	Manövermanagement
Grün 1, Blau 2, Rot 3	Neue Ziele erhalten	Autopilot
Blau 2 an ZS	"Hindernis detektiert!"	Autopilot
ZS (intern)	Formation auflösen	Manövermanagement
ZS an Team	"Rot führt, der Rest folgt!"	Manövermanagement
Rot 3 an ZS	OK, ich führe Richtung Ziel	Autopilot
Grün 1	OK, ich folge Rot	Autopilot
Blau 2	OK, ich folge Grün	Autopilot
Rot 3 an ZS	Hindernis detektiert, weiche aus!	Autopilot
Grün 1	Hindernis detektiert, weiche aus!	Autopilot
Rot 3	Hindernis passiert, altes Ziel aufnehmen!	Autopilot
Blau 2	Hindernis detektiert, weiche aus!	Autopilot
Grün 1	Hindernis passiert, altes Ziel aufnehmen!	Autopilot
Blau 2	Hindernis passiert, altes Ziel aufnehmen!	Autopilot
ZS (intern)	Team hat Hindernis passiert	Manövermanagement
ZS an Team	"Formation einnehmen!"	Manövermanagement
Grün 1, Blau 2, Rot 3	Neue Ziele erhalten	Autopilot
Rot 3 an ZS	"Ziel erreicht!"	Autopilot
Grün 1 an ZS	"Ziel erreicht!"	Autopilot
Blau 2 an ZS	"Ziel erreicht!"	Autopilot
ZS (intern)	Formation OK	Manövermanagement
ZS an Team	"Ziel anfahren!"	Manövermanagement
Grün 1, Blau 2, Rot 3	Neue Ziele erhalten	Autopilot
Rot 3 an ZS	"Ziel erreicht!"	Autopilot
Grün 1 an ZS	"Ziel erreicht!"	Autopilot
Blau 2 an ZS	"Ziel erreicht!"	Autopilot
ZS an Mensch	"Auftrag ausgeführt!"	Manövermanagement
Mensch	OK, habe ich wahrgenommen!	Missionsmanagement

gestellt wird. Nachdem das Ziel erreicht wurde (Abbildung 5-10), wird wieder in den Zustand „direkte Zielfahrt“ geschaltet (Abbildung 5-11), und die Systeme legen das restliche Stück zum Ziel zurück.

Betrachtet man die während der Mission angefallenen Aktionen in Tabelle 5-1, stellt man fest, dass die Häufigkeit der Eingriffe der einzelnen Ebenen von oben nach unten zunimmt. Der Mensch tritt nur als Strategie und Planer auf, der die Anweisungen gibt und nach der Missionsausführung das Resultat überprüft. Die ZS als taktisches Element bestimmt die aktuell nötigen Formationen und überwacht die Ausführung. Die Roboter als ausführende Organe treten am häufigsten in Aktion, wobei ihnen die Entscheidungen mit der geringsten Bedeutung zukommen. Dennoch nutzen sie durch die adaptive Autonomie den Vorteil, direkt am Ort des Geschehens zu sein und zeitkritische Entscheidungen, wie das Ausweichen vor Hindernissen, selbständig zu treffen, ohne auf latenzzeitbehaftete Kommunikation mit höheren Instanzen zurückzugreifen. Die Aufteilung der Aktionen, die sich in der Simulation ergeben hat, deckt sich mit der im Prinzip des Rational Behaviour Model gezeigten Zuteilung von Taktzeit und Abstraktion (s. Abbildung 2-13).

5.2 Kooperierendes Verhalten von Teilnehmern im Straßenverkehr

Die im Kapitel 5.1 vorgestellten Techniken können auch auf weiterführende Umsetzungen übertragen werden, welche außerhalb reiner Robotikanwendungen liegen. Der Autor stellte einen entsprechenden Ansatz in [Glo06] vor, bei welchem in konzeptionellem Rahmen ein Einsatz im Straßenverkehr dargestellt wurde. Zielstellung ist die Koordination des Verkehrs auf einer Straße,

bei welcher zwei Spuren in eine Richtung führen. Die Fahrbahn für den Gegenverkehr wird nicht betrachtet. Eine entsprechende Situation findet sich etwa auf einer Autobahn.

Es bewegen sich Fahrzeuge auf beiden Spuren der Fahrbahn. Als Geschwindigkeiten der Fahrzeuge werden die normierten, einheitenlosen Werte von 100 auf der rechten und 150 auf der linken Fahrbahn angenommen. Nach dem plötzlichen Auftauchen eines Hindernisses auf der rechten Spur müssen alle dort befindlichen Fahrzeuge das Hindernis auf der linken Spur umfahren. Es wird angenommen, dass die Fahrzeuge, welche ursprünglich auf der rechten Spur unterwegs sind, ihre Geschwindigkeit nicht über 100 erhöhen können oder sollen. Folglich werden einige der Fahrzeuge auf der linken Spur ihre Geschwindigkeit verringern müssen, um das Vorbeifahren für andere Fahrzeuge zu ermöglichen.

Die beschriebene Situation erinnert prinzipiell an das vorgestellte Teamverhalten mobiler Systeme. An dieser Stelle soll ein autonomer Betrieb der Fahrzeuge angenommen werden. Es sind bereits technische Umsetzungen als Prototypen vorhanden, um Fahrzeuge auf Straßen mit Hilfe von Spurerkennung autonom zu bewegen. Ein Beispiel ist das EU-Projekt Prometheus, welches sich mit *Kognitiven Automobilen* und maschinellern Sehen beschäftigte. Hier wurden bereits in Demonstrationen autonom fahrende Automobile mit Geschwindigkeiten bis 130 km/h im normalen dreispurigen Autoroute-Verkehr bei Paris realisiert ([SD94], [Dic05]). Am Fraunhofer IITB in Karlsruhe fanden ab Mitte der achtziger Jahre Experimente zur sichtsystemgestützten Fahrzeugführung unter Nutzung expliziter Fahrbahn- und Fahrstreifenmodelle statt ([NES95], [Sie+92]). Auch bei der Fa. Volkswagen fanden Untersuchungen zur Umrüsten von Serienfahrzeugen in autonome Fahrzeuge durch multisensorielle Wahrnehmungssysteme ([Sch+00], [Sti+00]). Eine aktuelle Forschungsaktivität beschreibt [Sti+05]. Einsatzmöglichkeiten im Straßenverkehr mit menschlichen Fahrern werden im Ausblick in Kapitel 6.1.3 besprochen.

Bei der Umsetzung werden die Fahrzeuge nur bedingt als kooperierende Systeme wahrgenommen, da im besprochenen Szenario auch vollkommen heterogene Systeme zum Einsatz kommen können, welche nichts miteinander zu tun haben. Wichtig ist das Bestehen fester Regeln, welche etwa aus der Straßenverkehrsordnung übernommen werden können. So muss etwa jedes Fahrzeug, welches einen Spurwechsel vornehmen will, den Fahrzeugen auf der Zielspur Vorfahrt gewähren. Dennoch ist es auch den Fahrzeugen auf der Zielspur (in diesem Fall der linken Spur) zuzumuten, ihre Geschwindigkeit zu verringern, um langsameren Systemen einen Überholvorgang zu ermöglichen. Voraussetzung ist dabei natürlich, dass der Spurwechsel nicht zu knapp vor einem Fahrzeug erfolgt, was ein starkes Bremsen zur Vermeidung eines Auffahrunfalls zur Folge hätte.

Das beschriebene Szenario ist in Abbildung 5-13 bis Abbildung 5-18 in Virtual Reality dargestellt. Als Vorlage für die Fahrzeuge diente dabei das Chassis der bereits beschriebenen „MauSI“-Roboter. Es wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge Kommunikationsverbindungen zueinander herstellen und sich gegenseitig wahrnehmen können. Außerdem sei als Vereinfachung angenommen, dass vorgegebene Geschwindigkeiten exakt eingehalten werden können.

Abbildung 5-13 stellt die Ausgangssituation mit Blickrichtung gegen die Fahrtrichtung dar. Ganz vorne ist das Hindernis zu sehen, welches die rechte Spur blockiert. Zwei Fahrzeuge nähern sich auf der rechten Spur, ein blaues und ein grünes. Auf der linken Spur befinden sich vier Fahrzeuge, welche von vorne nach hinten die Farben weiß, cyan, gelb und rot haben. Die Kugeln über den Fahrzeugen haben nur darstellenden Zweck und geben den aktuellen Zustand an. Außerdem sind jeweils die Kugeln von zwei kommunizierenden Fahrzeugen mit einer Linie verbunden. Im Folgenden wird der Ablauf der Vorgänge beschrieben. Dabei ist jedem Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt ein Autonomiegrad zugeordnet, welcher beschreibt, mit welcher Geschwindigkeit das Fahrzeug zum jeweils aktuellen Zeitpunkt fahren darf. Die Verläufe dieser Grade sind

für alle Fahrzeuge in Abbildung 5-19 auf Seite 178 dargestellt. Die Kästchen auf den Linien zeigen einen Kommunikationsvorgang an. Das Auftreten des Hindernisses erfolgt zur normierten Zeit 14 und ist durch die Balken in den Diagrammen gekennzeichnet. Die Zuordnung von den jeweiligen Geschwindigkeiten für die Fahrzeuge zu den wertdiskreten Autonomiegraden ist in Tabelle 5-2 auf Seite 177 angegeben. Der Zustand zu Beginn der Simulation ist in Abbildung 5-12 in Draufsicht dargestellt.

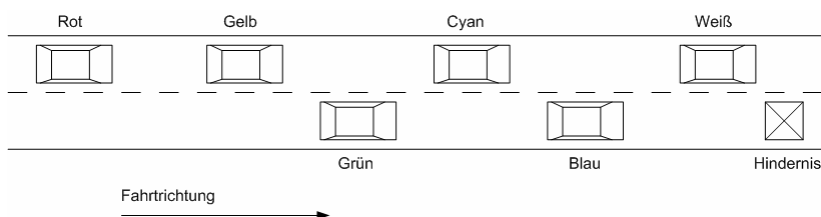


Abbildung 5-12: Situation auf der Fahrbahn zum Startzeitpunkt



Abbildung 5-13: Mehrere Fahrzeuge auf einer zweispurigen Fahrbahn mit Hindernis

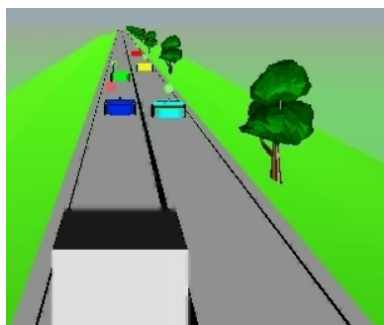


Abbildung 5-14: Die Fahrzeuge organisieren das Ausweichen auf die linke Spur

Vom Auftauchen des Hindernisses auf der rechten Spur nach Abbildung 5-13 zum Zeitpunkt 14 sind zunächst die Fahrzeuge auf der linken Spur nicht be-

treffen. Entsprechend kann das weiße Fahrzeug im Vordergrund ohne Einschränkung weiterfahren. Zur selben Zeit stellt das blaue Fahrzeug auf der rechten Spur fest, dass es die Spur wechseln muss. Entsprechend nimmt es Kontakt mit dem nächsten Fahrzeug auf der linken Spur auf, dem cyanfarbenen. Dies ist der Kommunikationsvorgang, welcher in Abbildung 5-13 durch die Linie zwischen den Fahrzeugen und in Abbildung 5-19 durch die Quadrate zum Zeitpunkt 14 bei den beiden Fahrzeugdiagrammen angezeigt wird. Da der Abstand zwischen beiden Fahrzeugen zu gering ist, wird dem blauen Fahrzeug der Spurwechsel untersagt. Das Fahrzeug in cyan kann ohne Einschränkungen weiterfahren; das blaue allerdings muss seine Geschwindigkeit verringern, um eine Kollision mit dem Hindernis zu vermeiden und das andere Fahrzeug zunächst passieren zu lassen. Deswegen wird der blaue Autonomiegrad auf 50% abgesenkt, was in einer Geschwindigkeitsreduktion auf 70 resultiert. Zum Zeitpunkt 14,5 nimmt das blaue Fahrzeug mit dem hinter ihm fahrenden grünen Kontakt auf, um die Geschwindigkeitsbeschränkung zu übermitteln. Dieser Kommunikationsvorgang wird in Abbildung 5-14 dargestellt. Nach Abbildung 5-19 senkt das grüne Fahrzeug unmittelbar danach seinen Autonomiegrad sowie seine Geschwindigkeit, um ein Annähern an den Vorausfahrenden zu verhindern.

Nur auf Abbildung 5-19 dargestellt ist der folgende Kommunikationsvorgang zum Zeitpunkt 15. Hierbei nimmt Blau mit dem folgenden Fahrzeug auf der linken Spur, Gelb, Kontakt auf. Da der Abstand zwischen beiden Fahrzeugen ausreichend groß ist, wird das gelbe Fahrzeug dem blauen den Spurwechsel ermöglichen. Dies hat ein Absinken des Autonomiegrades für das gelbe Fahrzeug zur Folge. Da Blau mittlerweile auf einer Höhe mit Cyan ist und den Spurwechsel entsprechend in sehr kurzer Zeit vollziehen kann, ist es ausreichend, den gelben Autonomiegrad auf 66% zu beschränken. Damit bleibt Gelb mit einer Geschwindigkeit von 100 zwar schneller als Blau. Allerdings

wird Blau nach dem Spurwechsel seine Geschwindigkeit auch wieder auf diesen Wert erhöhen, so dass keine Kollisionsgefahr vorliegt.

Abbildung 5-15 zeigt den nächsten Kommunikationsvorgang zum Zeitpunkt 15,5. Das grüne Fahrzeug, welches ebenfalls die Spur wechseln muss, kontaktiert das nächste Fahrzeug auf der linken Spur, das gelbe. Wie bereits zuvor bei Blau und Cyan, ist auch in dieser Situation der Abstand zu klein. Das grüne Fahrzeug muss also zunächst auf seiner Spur verbleiben. Eine weitere Absenkung des Autonomiegrades ist nicht nötig, da dieser ja bereits auf 50% verringert ist. Zum selben Zeitpunkt vollzieht Blau den Spurwechsel. Nach dessen Abschluss besteht keine Kollisionsgefahr mehr mit dem Hindernis. Blau stellt wieder einen Autonomiegrad von 100% her und bewegt sich mit Maximalgeschwindigkeit.

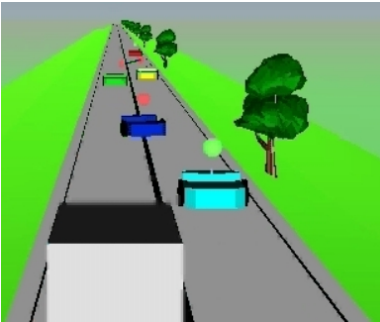


Abbildung 5-15: Eine Lücke wurde auf der linken Fahrbahn geschaffen; das erste Fahrzeug kann ausscheren

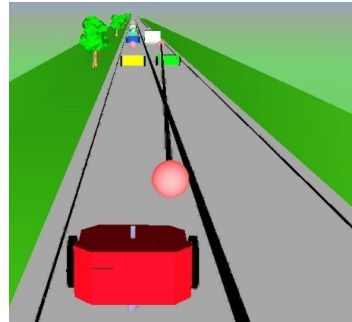


Abbildung 5-16: Das zweite rechtsfahrende Fahrzeug verständigt sich mit einem der linksfahrenden

Zum Zeitpunkt 16,5 kommt das rote Fahrzeug in Kommunikationsreichweite. Die erste Kommunikation findet mit Gelb statt. Da Gelb nur noch einem Autonomiegrad von 66% hat und seine Geschwindigkeit entsprechend abgesenkt hat, muss dieser Zustand auch Rot mitgeteilt werden. Rot senkt seinen

Autonomiegrad ebenfalls auf 66% und wird unmittelbar darauf vom grünen Fahrzeug kontaktiert (s. Abbildung 5-16). Da der Abstand groß genug ist, wird Grün gestattet, den Spurwechsel vor Rot durchzuführen. Da der Spurwechsel erst nach dem Vorbeifahren von Gelb möglich ist, muss die Geschwindigkeit des roten Fahrzeuges weiter eingeschränkt werden, um ein zu dichtes Auffahren zu verhindern. Daher senkt Rot den Autonomiegrad auf 33% ab und bewegt sich im Folgenden entsprechend mit derselben Geschwindigkeit wie Grün fort.

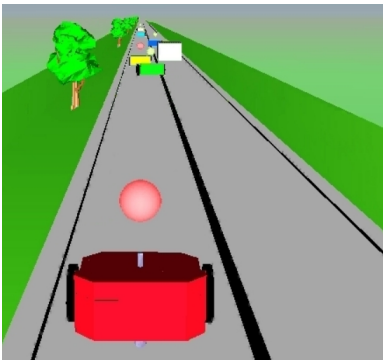


Abbildung 5-17: Während das zweite Fahrzeug nach links ausscheren kann, kehrt das erste auf die rechte Spur zurück

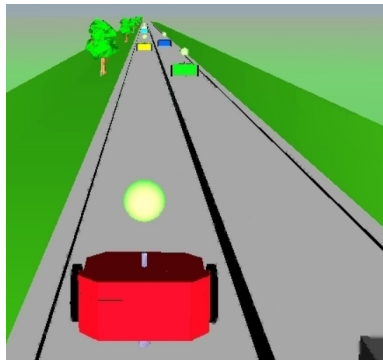


Abbildung 5-18: Beide rechtsfahrenden Fahrzeuge haben das Hindernis umfahren

Als nächstes kommt es zum Spurwechsel von Grün. Zum selben Zeitpunkt hat das blaue Fahrzeug das Hindernis umfahren und wechselt wieder auf die rechte Spur (s. Abbildung 5-17). Im Anschluss daran kommt es zum Zeitpunkt 19,5 zu zwei Kommunikationsvorgängen, wie auf Abbildung 5-19 dargestellt wird: Zum einen teilt das blaue Fahrzeug dem gelben mit, dass es die linke Spur wieder verlassen hat, weshalb der gelbe Autonomiegrad wieder auf 100% angehoben werden kann. Zum anderen hat das grüne Fahrzeug nach erfolgtem

Spurwechsel wieder seinen vollen Autonomiegrad aufgenommen und bewegt sich mit Maximalgeschwindigkeit. Dies teilt es dem nun hinter ihm fahrenden Rot mit, welches daraufhin ebenfalls seine Geschwindigkeit wieder erhöhen kann und einen Autonomiegrad von 66% wiederherstellt.

Eine halbe Zeiteinheit später teilt Gelb Rot mit, dass es sich nun wieder mit Maximalgeschwindigkeit bewegt. Rot nimmt dies zur Kenntnis, verbleibt aber weiter im eingeschränkten Autonomiegrad, da das grüne Fahrzeug noch vor ihm ist. Erst wenn auch das grüne Fahrzeug wieder auf die rechte Spur zurückgekehrt ist und dies über die Kommunikationsverbindung zum Zeitpunkt 22 mitteilt, kann auch Rot wieder einen Autonomiegrad von 100% erreichen. Der Zustand nach erfolgreichem Umfahren des Hindernisses ist in Abbildung 5-18 dargestellt.

Tabelle 5-2: Geschwindigkeitsvorgaben für die Fahrzeuge in Abhängigkeit des aktuellen Autonomiegrades

Autonomie- grad	Geschwindigkeit für Fahr- zeuge auf der linken Spur [normiert] Weiß, Cyan, Gelb, Rot	Geschwindigkeit für Fahr- zeuge auf der rechten Spur [normiert] Blau, Grün
100%	150	100
66%	100	-
50%	-	70
33%	70	-

Im vorgestellten Beispiel konnte das Konzept der Adaptiven Autonomie in Abwandlung auch zur Koordination des Verkehrsflusses auf einer Autobahn

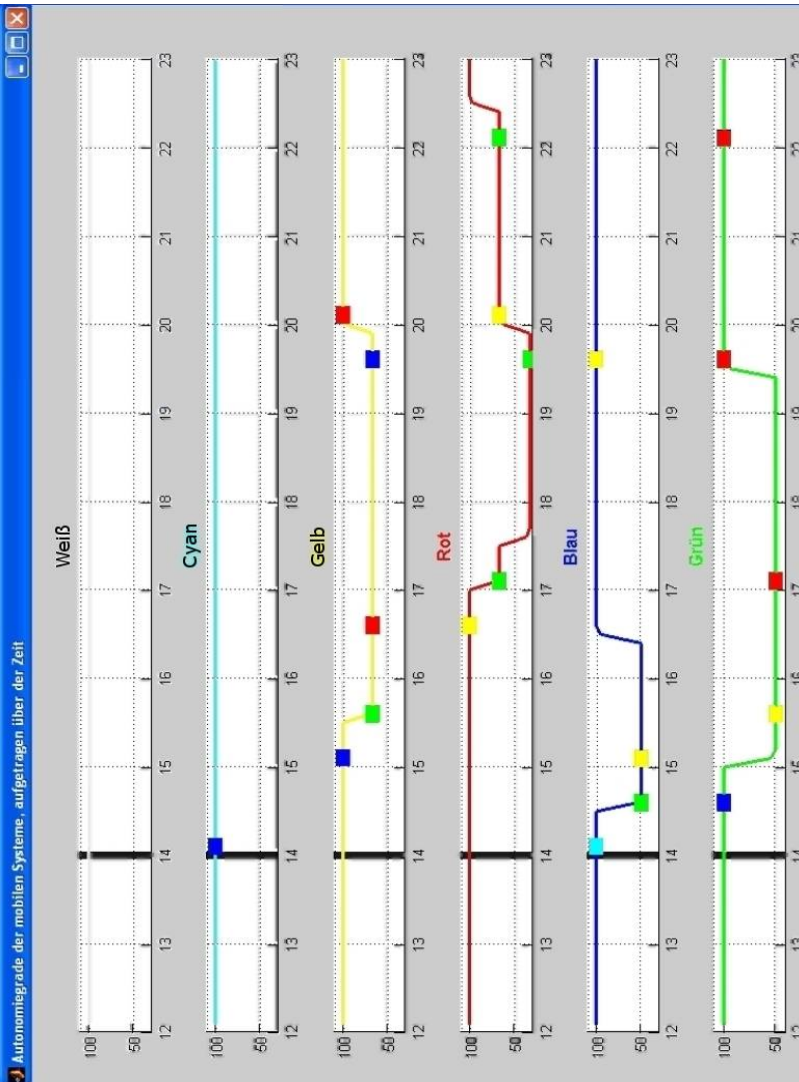


Abbildung 5-19: Autonomiegrade der mobilen Systeme während der vorgestellten Situation, aufgetragen über der normierten Zeit

eingesetzt werden. Die einzelnen Fahrzeuge wurden dabei nicht als kooperierendes Team interpretiert. Dennoch waren sie festen Regeln unterworfen, welche einen geordneten Ablauf gewährleisteten. Dabei muss jedoch eine umfassende Kommunikation zwischen allen Fahrzeugen, welche einen bestimmten Abstand zueinander unterschreiten, garantiert sein. Der Autonomiegrad wurde hier als Marschgeschwindigkeit aufgefasst. Entsprechende Überlegungen wurden bereits in Kapitel 3.3 gemacht (s. etwa Abbildung 3-6). Bei diesem Beispiel wird die große Bandbreite möglicher Anwendungen und Umsetzungen des Konzeptes der Adaptiven Autonomie deutlich.

5.3 Beispielmission eines Teams autonomer maritimer Fahrzeuge

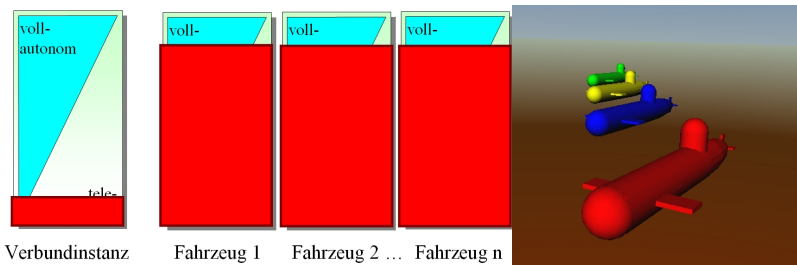


Abbildung 5-20: Ideale Situation - Unterwasserfahrzeuge in geordneter Formation

Im Rahmen des GREX-Projektes ([Atl+05], [Gre07]) wird unter Mitarbeit des Autors an der Umsetzung von Teams autonomer maritimer Fahrzeuge gearbeitet. Für die mögliche Aufgabe, dass eine bestimmte Anzahl von Unterwasserfahrzeugen in geschlossener Formation einen vorgegebenen Pfad abfahren soll, werden im folgenden die möglichen Zustände unter den Gesichtspunkten der Adaptiven Autonomie dargestellt.

Besonders in Unterwasserszenarien muss auf die beschränkten Kommunikationsmöglichkeiten geachtet werden. Daher müssen die Fahrzeuge im Allgemeinen mit höherem Autonomiegrad arbeiten, als es bei Landsystemen der Fall wäre. Abbildung 5-20 zeigt eine Situation, in welcher sich die Unterwasserfahrzeuge in einer geschlossenen Formation bewegen. Entsprechend operieren die Systeme mit hohem Autonomiegrad. Jedes Fahrzeug bewegt sich mit zuvor erhaltenen Bewegungsdaten, etwa einem Ziel oder ein Richtungswinkel und eine Geschwindigkeit. Der Autonomiegrad der Verbundinstanz arbeitet dementsprechend auf einem niedrigen Autonomielevel. Er hat lediglich die Aufgabe, in bestimmten Zeitabständen die Einhaltung der Formation zu prüfen. Erst wenn es zu Abweichungen in der Formation kommt und Maßnahmen zur Wiederherstellung ergriffen werden müssen, wird der Autonomiegrad der Verbundinstanz erhöht, was gleichzeitig zu einer Senkung der Autonomiegrade der Einzelsysteme führt. Jetzt werden neue Fahrbefehle generiert und an die Einzelsysteme übergeben, um die gewünschte Formation wiederherzustellen. Ist dies gelungen, wird wieder in den alten Zustand übergegangen. Die Situation der nicht intakten Formation ist in Abbildung 5-21 dargestellt. Der Vorgang wäre, wenn man die Verbundsoftware nach dem RBM wie in Kapitel 3.3 beschrieben darstellt, auf der Exekutiv-/Autopilot-Ebene anzusiedeln.

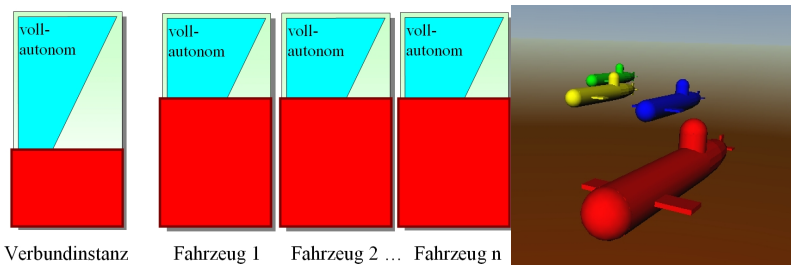


Abbildung 5-21: Unterwasserfahrzeuge in nicht intakter Formation

Eine andere Situation, in welcher die Verbundinstanz eingreifen muss, ist in Abbildung 5-22 dargestellt. Es liegt ein Hindernis im Weg der Fahrzeuge. Die bestehende Formation wird aufgelöst und in eine Linienformation umgewandelt. Dazu wird die Autonomie der Einzelfahrzeuge deutlich abgesenkt und in gleichem Maße die Autonomie der Verbundinstanz erhöht. Dadurch lässt sich eine neue Formation einnehmen, bis das Hindernis umfahren ist. Im RBM-Modell wäre dieser Vorgang der Taktischen Ebene / Manövermanagement zuzuschreiben.

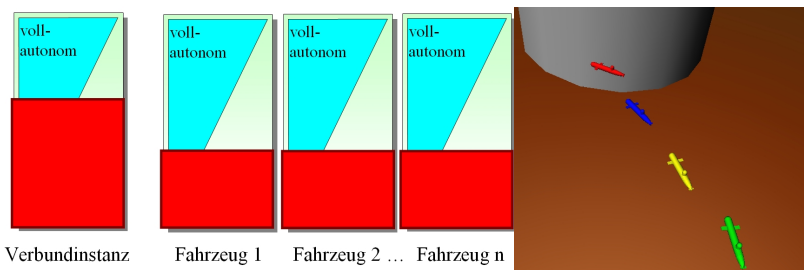


Abbildung 5-22: Ein Verbund aus Unterwasserfahrzeugen umfährt ein Hindernis

Bei der Umsetzung für die MauSI-Systeme kam es dagegen im Zustand der Hindernisvermeidung bei den Autonomiegraden der Einzelsysteme nach einem kurzen Absinken (die Zentralsteuerung gibt die neue Struktur vor) zum Anstieg, besonders die des Führungsfahrzeuges, aber auch der anderen Systeme, wenn sie selbständig die Hinderniskanten umfahren. In Abbildung 5-22 wird für den Zustand der Hindernisumgehung für den Anwendungsfall eines Teams aus Unterwasserfahrzeugen eine geringere Autonomie der Einzelsysteme angenommen. Dies ist kein Widerspruch, es zeigt sich vielmehr, dass der Ablauf der Autonomieadaptation nicht nur von den Aufgaben, sondern auch von deren prinzipieller Lösung abhängt. Die simulierten MauSI-Roboter nutzten Infrarotsensoren mit relativ geringen Reichweiten, so dass sie reaktiv auf auftauchende Hindernisse reagieren mussten. Eine umfassende Aufklärung der

Hindernissituation vor Ort mittels Sensoren mit langer Reichweite war nicht möglich. Im Unterwasserbereich wäre es denkbar, eine Situation mittels weitreichender Sensoren vollständig aufzuklären und dann eine optimale Route zur Durchfahrt zu bestimmen. Dies wurde etwa von M. Eichhorn in [Eic04] und [Eic07] für Einzelsysteme aufgezeigt. Überträgt man dies auf Teams, so wäre die Zentralintelligenz für diese Umplanung zuständig. Den einzelnen Unterwasserfahrzeugen würde anschließend ein abgeänderter Missionsplan übergeben, welcher ein entsprechendes Umfahren garantiert und somit zu einer tatsächlichen Absenkung der Autonomie der Einzelsysteme führen würde.

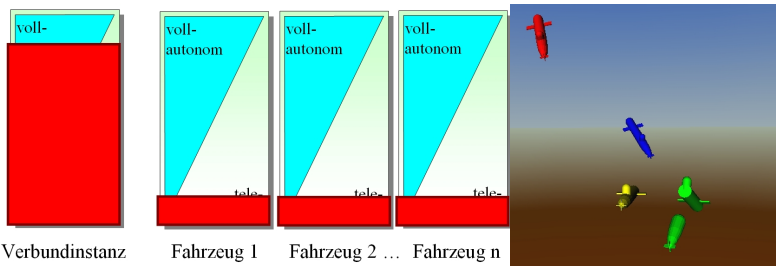


Abbildung 5-23: Havarie eines Einzelsystems - Die Gruppe teilt sich auf

In bestimmten Fällen kann ein enormer Eingriff in die Autonomie der Einzelsysteme notwendig sein. Abbildung 5-23 stellt eine Situation dar, in welcher eines der Verbundmitglieder havariert ist. Die komplette Mission wird daraufhin abgebrochen bzw. neu gestaltet. Dafür ist die Strategische Ebene / Missionsmanagement nach dem RBM-Modell verantwortlich. Der Bergung des havarierten Systems wird jetzt höchste Priorität eingeräumt. Zwei Verbundmitglieder tauchen direkt auf, um eine Notfallmeldung an den Bediener abzusetzen. Ein drittes Fahrzeug bleibt in der Nähe des Havaristen, um die Ortung zu erleichtern. Die Verbundinstanz übernimmt kurzzeitig die vollständige

Kontrolle, indem den einzelnen Fahrzeugen ganz neue Ziele übergeben werden.

Deutlich gemacht wurde auch, dass für unterschiedliche Lösungen gleicher Missionsaufgaben sehr unterschiedliche Designs für die Entwicklung der Autonomiegrade von Einzelsystemen und Teaminstanz realisiert werden können; etwa bei der Hindernisvermeidung in den Anwendungsszenarien MauSI-Systeme und Unterwasserfahrzeuge. Dadurch wird der Wert des vorgeschlagenen Autonomiekonzeptes deutlich: Unterschiedliche Realisierungen lassen sich einordnen und dadurch miteinander vergleichen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Übertragung der Resultate auf reale Systeme und industrielle Anwendungen

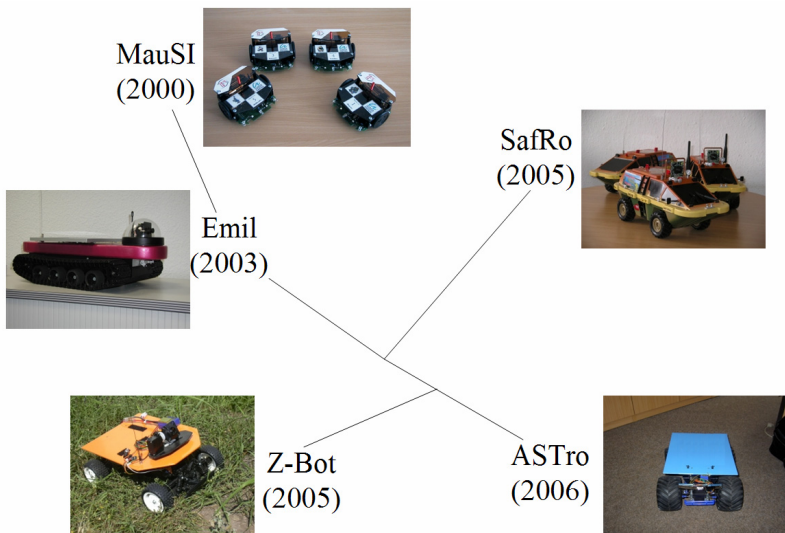


Abbildung 6-1: Die Evolution der Robotikplattformen an der Technischen Universität Ilmenau und dem Fraunhofer AST Ilmenau; in Klammern die Jahreszahlen

Während der Tätigkeit des Autoren an der Technischen Universität Ilmenau und dem Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik Ilmenau wurden unterschiedliche Anstrengungen unternommen, die erzielten Erkenntnisse auf die Realität zu übertragen. Abbildung 6-1 zeigt die Evolution der Robotikplatt-

formen an den beschriebenen Forschungseinrichtungen. Das System MauSI wurde bereits in Kapitel 4.1 vorgestellt. Es diente als Einstiegsmodell in den Bereich realer mobiler Systeme am Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik der Technischen Universität Ilmenau und wurde als Testplattform für den Test von einfachen Softwarealgorithmen zur Autonomie eingesetzt. Die Realisierung auf der Basis des Differential Drive bewirkte ein hochmobiles Verhalten, welches jedoch nur auf absolut glattem, sauberen Untergrund einsetzbar war („Labortischsystem“). Ein weiteres Problem war die geringe Größe des Systems, welche die Anbringung weiterer Standardkomponenten verhinderte, so dass eine Weiterentwicklung unumgänglich war.

6.1.1 Das mobile System ASTro

Vorgabe für die Entwicklung eines neuen mobilen Systems war eine ausreichender Größe (Länge bis maximal 50 cm), welches im Wesentlichen aus möglichst kostengünstigen Komponenten aus dem Modell- und Spielzeugsektor verfügt. Mögliche Einsatzgebiete sollten dabei sowohl Indoor- als auch Outdoor-Bereiche umfassen, wobei auch eine prinzipielle Geländegängigkeit gegeben sein sollte. Eine wesentliche Forderung war die Möglichkeit zur Fortbewegung mit hoher Geschwindigkeit, da unterschiedliche Probleme im autonomen Fortbewegen gerade in diesem Bereich zu Tage treten bzw. eine besondere Rolle spielen. Das System soll sowohl vollständig teleoperiert, als auch hochautonom eingesetzt werden können.

Die Entwicklung wurde schließlich als ein Gemeinschaftsprojekt der Technischen Universität Ilmenau und des Fraunhofer AST Ilmenau fortgeführt und mündete im System „ASTro“ (AST steht für ‚Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik‘ oder ‚Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik‘, ro steht für Roboter), s. Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2. Das System befindet sich noch in Entwicklung und soll als Basisplattform der in dieser Arbeit

vorgestellten Strategien zur Autonomie sowie weiterer Projekte an den beiden Forschungseinrichtungen eingesetzt werden. Folgende Eigenschaften werden in diesem Projekt umgesetzt:

- Stabile Basisplattform aus dem Modellbaubereich mit zwei getrennt lenk- und antreibbaren Achsen
- Energieversorgung durch Lithium-Polymer-Akkus (hohe Kapazität, niedriges Gewicht und Ausmaße, Hochstromfähigkeit)
- Zweistufige Hardware mit Embedded PC für rechenintensive, zeitungskritische Applikationen sowie 16 Bit-Microcontroller für weniger rechenintensive Aufgaben mit Echtzeitanforderungen
- Umfangreiche Sensorik zur Hinderniserkennung (Ultraschall, Laser), Selbstlokalisierung (mit inertialen und globalen Elementen) sowie mehrerer beweglicher Kamerasysteme
- Nutzung von Kommunikationsnetzwerken auf der Basis von WLAN
- Innovative Mensch-Maschine-Schnittstelle mit Möglichkeiten zu weiteren Forschungsaktivitäten im Bereich der optimalen Einbindung eines menschlichen Operators in die Missionsausführung teilautonom mobiler Systeme
- Adaptives Steuerframework auf Basis von Windows und Linux zum plattformunabhängigen, parallelen Einsatz für Simulation und reale Systeme

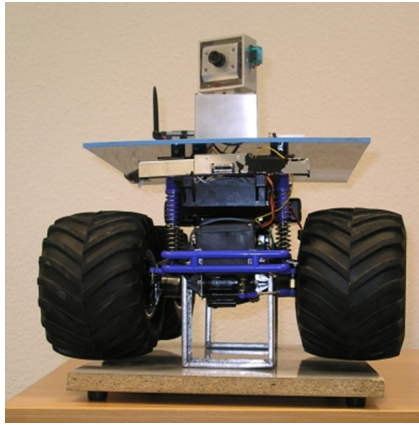


Abbildung 6-2: Das mobile System ASTro

Dieses System soll nach Fertigstellung ein Standardsystem für die Demonstration entsprechender Konzepte und Realisierungen an den beteiligten Forschungseinrichtungen werden. Beispielsweise kann es als Modell für das in Kapitel 2.3 gezeigte Großsystem des Fraunhofer AST zum Einsatz kommen.

6.1.2 Übertragung auf industrielle Anwendungen in der maritimen Industrie

In Zusammenarbeit mit industriellen Partnern, wie etwa der Atlas Elektronik GmbH, wurden zusätzliche Anstrengungen unternommen, die gewonnenen Erkenntnisse in industriell nutzbare Resultate zu überführen. Im Rahmen des von der Europäischen Kommission geförderten europäischen Verbundprojektes GREX, Sixth Framework Programme, FP6-IST-2006-035223, ([Atl+05], [Gre07]), an welchem der Autor mitwirkt, sind verschiedene denkbare Szenarien für den Einsatz von Teams aus unbemannten Wasserfahrzeugen vorgestellt. In Abbildung 6-3 ist die Suche nach hydrothermalen Spalten dargestellt. Es wurde bereits eine Menge Wissen über hydrothermale Tiefsee-Spalten

sowie deren faszinierende Ökosysteme und chemosynthetische Lebensformen zusammengetragen. Wissenschaftler erhoffen sich durch weitere Erforschungen Erkenntnisse über die Evolution. Darüber hinaus besteht auch ein großes Interesse der biotechnischen Industrie. Es gibt deutliche Hinweise darauf, dass es solche Spalten auch in flacheren Gewässern bis in eine Tiefe von etwa 150 Metern gibt.

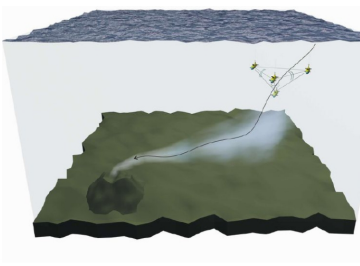


Abbildung 6-3: Suche nach hydrothermalen Schloten [Atl+05], [Gre07]

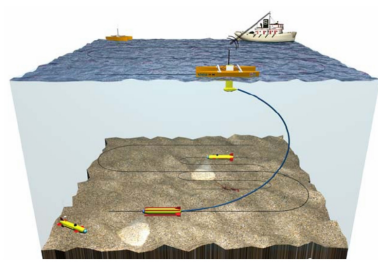


Abbildung 6-4: Kartografierung von Meereslebensräumen [Atl+05], [Gre07]

Für eine weiterführende Erforschung müssen effiziente Möglichkeiten zum Auffinden solcher hydrothermalen Spalten entwickelt werden. Dabei ergeben sich Möglichkeiten für den Einsatz von Teams aus maritimen Fahrzeugen. Eine sinnvolle Mission könnte zweigeteilt sein. Zunächst erstellt ein Team aus autonomen Unterwasserfahrzeugen (AUVs) unter Einsatz akustischer Sensoren eine einigermaßen exakte Karte des Einsatzgebietes. Anhand dieser Karte können entsprechende Spezialisten anhand geologischer Eigenschaften Indikatoren für das Vorhandensein einer hydrothermalen Spalte finden und letztendlich kleinere Suchgebiete definieren. Aufgrund des Wissens, dass hydrothermale Spalten Methangas ausstoßen und dass Methangas sich im Wasser nur langsam auflöst, werden die AUVs im zweiten Missionsteil mit entsprechenden Gassensoren ausgestattet. Als Sensornetzwerk fungierend, können die Systeme in Kooperation den Gradienten für die räumliche Ausbreitung des Methans

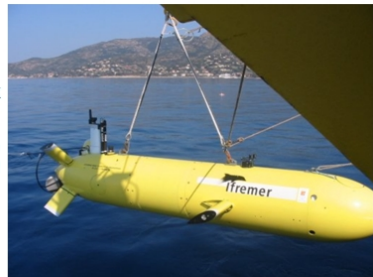
berechnen und dem steigenden Gradienten folgen. Die Aufgabe des Teams besteht dann darin, gemeinsam die hydrothermale Spalte zu finden.

Eine weitere, in Abbildung 6-4 dargestellte Einsatzmöglichkeit besteht in der Kartografieren von Meereslebensräumen. Dabei werden die Meerestiefen und die Zusammensetzung des Meeresbodens aufgezeichnet. Solche Messungen erlauben den Informationsgewinn über Verteilung und Ausbreitung entsprechender Meereslebensräume, woraus sich wiederum Anforderungen zur Erhaltung entsprechender Lebensräume ableiten lassen. Der Einsatz von maritimen Fahrzeugen in Teams erlaubt eine Verbesserung und Automatisierung der klassischen Vorgehensweise, wie sie von Meereswissenschaftlern angewandt wird. Denkbar wäre etwa, wie in Abbildung 6-4 gezeigt wird, der Einsatz eines Überwasserfahrzeuges (ASV = Autonomous Surface Vehicle), das als Teamleiter fungiert. Das ASV steht über Funk in Kontakt mit einem Versorgungsschiff oder einer entsprechenden Einrichtung auf dem Land. Ein ferngesteuertes maritimes Fahrzeug (ROV) ist durch ein Lichtwellenleitkabel mit dem ASV verbunden und wird von diesem gelenkt. Beide Fahrzeuge fahren entlang festgelegter Bahnen, etwa mäanderförmig, über das zu kartografierende Gebiet. Das ROV nimmt Bilder und andere Messdaten vom Meeresboden auf, welche online über Lichtwellenleiter und Funk zu den Wissenschaftlern im Versorgungsschiff oder der Einrichtung auf dem Land geschickt werden. Gleichzeitig halten sich einige AUVs in der Nähe der ASV / ROV – Kombination in Bereitschaft. Wenn die Wissenschaftler ein interessantes Gebiet auf dem Meeresboden in den Aufzeichnungen entdecken, senden sie ein Signal zum ASV. Dieses weist daraufhin eines der AUVs an, im entsprechenden Gebiet weitere Messwerte aufzunehmen, während das ASV und das ROV ihre Mission fortsetzen. Diese Vorgehensweise erlaubt eine genaue Datenaufnahme bei schneller Missionsabwicklung.



SeaWulf

Atlas Elektronik, Bremen,
Deutschland



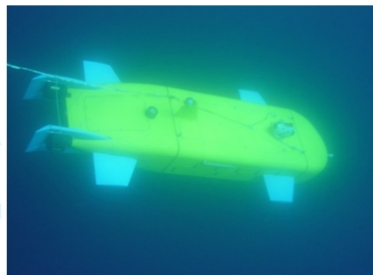
Aster^x

Ifremer, La Seyne sur Mer,
Frankreich



Delfim (Oberflächen- fahrzeug)

Instituto Superior Tecnico (IST), Lissabon,
Portugal



Infante

Instituto Superior Tecnico (IST), Lissabon,
Portugal

Alle Bilder sind Eigentum der jeweiligen Fahrzeugeigentümer

Abbildung 6-5: Übersicht über die im Forschungsprojekt GREX zum Einsatz kommenden unbemannten maritimen Fahrzeuge [Atl+05], [Gre07]

Beide beschriebenen Szenarien ermöglichen eine Vorstellung über die Herausforderungen entsprechender Teammissionen. Dabei sind gerade im Unterwasserbereich noch weitere Probleme zu lösen. Kabellose Kommunikation ist im Unterwasserbereich bisher nur relativ schmalbandig und auf kurze Distanzen möglich. Die Einbindung eines menschlichen Bedieners wird daher, in Relation zu den Möglichkeiten landgebundener Einsatzszenarien, nur im geringen Umfang möglich sein. Probleme bereitet außerdem die Lokalisierung, da nur im aufgetauchten Zustand auf das globale Positionsbestimmungssystem GPS zugegriffen werden kann. Auch die Sensorik muss an die Gegebenheiten im Unterwasserbereich angepasst sein (Dunkelheit, Druck etc.). Ein Steuerungskonzept zur zielgerichteten Führung von mehreren, teilweise unterschiedlichen Unterwasserfahrzeugen unter geringer Einbeziehung menschlicher Bediener wird zum Einsatz kommen. Umgesetzt werden diese Resultate auf realen maritimen Fahrzeugen, wie sie in Abbildung 6-5 dargestellt sind.

6.1.3 Übertragung auf industrielle Anwendungen an Land

Im Projektantrag TEAM [Atl+04] steht die Realisierung kooperierender Teams im Wasser und auf dem Land im Mittelpunkt. Das Projekt strebt an, die Grundlagen und Technologien für emergentes Verhalten von adaptiv autonomen, mobilen technischen Objekten zu Lande und im Unterwasserbereich zu entwickeln und exemplarisch zu testen. Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung von weitestgehend generischer Software für den Betrieb von mobilen, adaptiv autonomen, im Schwarm operierenden mobilen Systemen. Die Leistungsfähigkeit der Verfahren soll stufenweise in den potentiellen Anwendungsbereichen der autonomen Unterwasserfahrzeuge (AUV) und autonomen Landfahrzeuge im Schwerpunkt der fahrerlosen Transportsysteme (englisch Automated Guided Vehicle, AGV) experimentell nachgewiesen werden. Auf-

gabenbereiche, in welchen die Resultate eingesetzt werden können, sind unter anderem:

- Suchaufgaben
- Markierungsaufgaben
- Inspektionen in für Menschen gefährlichen Bereichen (Temperatur, Druck, Strahlung, chemische Substanzen...)
- Kontroll- und Überwachungsaufgaben (Schiffe, Bauten, Wasserstraßen für Flächen, Konzentrationen)
- Prävention / Absicherung (Überwachungs-, Unterstützungs- und Sicherungsstrategien für operierende Menschen / AUVs)
- Katastrophen- / Unglücksbewältigung
- Arbeiten in „rauem“ Umfeld (Steinbrüche, Deponien, Bergwerke)
- Handhabung, Transport und Lagerung hochgefährlicher Güter

Denkbar wäre besonders die Umsetzung verschiedenartiger unbemannter Landfahrzeuge, etwa eines Baggers und eines LKWs, wie in Abbildung 6-6 dargestellt. Aber auch Konvois aus gleichartigen Fahrzeugen sind sinnvoll. Einsatzort derartiger Teams sollen Halden oder Gruben sein, bei denen aufgrund von Strahlung, Explosionsgefahr oder allgemeiner Verunreinigung der Einsatz von Menschen als zu gefährlich angesehen wird.

Konkret zu realisieren ist die Konvoifähigkeit gleicher und unterschiedlicher Fahrzeugtypen in unterschiedlichen Formationen (hintereinander für Transportfahrten sowie versetzt bei unterschiedlichen Anwendungen wie Schneeräumen oder Ernte). Ein weiterer Punkt ist die Selbstorganisation in bestimmten Verkehrssituationen, wie Vorfahrtsregeln an Verkehrsknotenpunkten, die selbständige Bildung und Auflösung von Verbänden sowie das Überholen.



Abbildung 6-6: Fahrzeugteams bei Einsätzen in für den Menschen gefährlichen Gegenden

[Atl+04]

Weitere Möglichkeiten wurden beispielsweise im Kapitel 5.2 dargestellt. Prinzipiell sind auch kurzfristig Einsätze entsprechender Verfahren beispielsweise im Straßenverkehr möglich. In Abwandlung des gezeigten Beispiels müssten dann Hybridansätze mit den menschlichen Fahrern und entsprechenden Technologien zur Anwendung kommen. Da in der Automobilindustrie ein ständiger Trend zum Einsatz neuester Techniken zur Entlastung des Menschen vorherrscht, könnten auch Szenarien wie das in Kapitel 5.2 besprochene realistisch sein. Hierbei würde der Fahrer weiterhin das Auto steuern. Die gezeigten Autonomiegrade könnten in Maximalgeschwindigkeiten umgesetzt werden. Die aktorischen Voraussetzungen dazu sind im Rahmen von Geschwindigkeitsregelsystemen bereits realisiert und weitläufig im Einsatz. Darüber hinaus kann mit weiteren Überführungen von Technologien aus dem Bereich der mobilen Robotik in den Straßenverkehr gerechnet werden, ohne dass dabei eine vollständige Automatisierung in den nächsten Jahren angestrebt würde. Ein schrittweiser Einzug entsprechender Technologien kann

bereits beobachtet werden (Spurfolgen, Abstandshaltung, Notbremsung, Einparkhilfe).

6.2 Zusammenfassende Wertung und Ausblick

Das Themengebiet der mobilen Robotik und unbemannten Fahrzeuge umfasst eine Vielzahl von interessanten Aufgabenstellungen. Diese stammen aus den unterschiedlichsten Forschungsgebieten und erfordern eine intensive Zusammenarbeit von Experten aus den einzelnen Disziplinen. Gegenwärtig existiert eine Vielzahl unterschiedlichster Konzepte, von denen jedoch erst wenige die Lücke von der Theorie zur Praxis überschreiten konnten. Als Gründe wurden in dieser Arbeit sowohl die große Interdisziplinarität des Themengebietes als auch das Fehlen eines universellen Autonomiekonzeptes herausgearbeitet.

Zum einen wurden in Kapitel 2 unter der Beschreibung des aktuellen Standes von Forschung und Technik die unterschiedlichen Basistechnologien zur Umsetzung von unbemannten Systemen besprochen. Es wurde deutlich, dass dabei eine Vielzahl unterschiedlicher Experten (Maschinenbauer, Mechatroniker, Regelungs- und Systemingenieure, Informatiker und andere) Lösungen aus ihren spezifischen Fachgebieten einbringen müssen, um alleine die technischen Probleme bewältigen zu können. Es kann erwartet werden, dass dies auch in Zukunft eine nicht unwesentliche Herausforderung im Forschungsgebiet der mobilen Systeme ausmachen wird.

Zum anderen wurde in dieser Arbeit ein weiteres wesentliches Problem im Nichtvorhandensein eines einheitlichen Konzeptes des Begriffs „Autonomie“ herausgearbeitet. Es wurden unterschiedliche Definitionen aus der Literatur zitiert und deren Widersprüchlichkeit aufgezeigt. Es konnte beobachtet wer-

den, dass Autoren ihre spezifischen Definitionen von „Autonomie“ oftmals von ihren jeweiligen Aufgabenstellungen abhängig machten. So wurde in einigen Literaturstellen der Begriff „Autonomie“ als die Erkundung einer unbekannten Umgebung festgelegt, möglicherweise in Verbindung mit einer gleichzeitigen Kartografierung. Teilweise wurden Einsätze in bereits bekannter Umgebung ausgeschlossen und dafür der Begriff „Automatisierung“ vorgeschlagen. In anderen Literaturstellen wurde der Einsatz in bekannten Umgebungen explizit zugelassen, beziehungsweise es wurden keine einschränkenden Aussagen darüber gemacht, wobei die Definition der Autonomie in diesen Fällen über andere Eigenschaften des mobilen Systems erfolgte.

Durch diese Ausführungen konnte deutlich gemacht werden, dass die bestehende, unscharfe Auffassung des Begriffs „Autonomie“ die wissenschaftliche Zusammenarbeit verschiedener Experten deutlich erschwert. Dies gilt besonders aufgrund der beschriebenen Interdisziplinarität des Themengebietes. Um diese Probleme abzuschwächen, stellte sich diese Arbeit zum Ziel, ein neues Autonomiekonzept zu entwickeln, welches in übergeordneter Funktion die verschiedenen vorhandenen Vorstellungen in sich vereint und eine genaue Einordnung dieser Vorstellungen erlaubt. Dabei sollte die Menge der Daten eine Rolle spielen, welche ein „autonomer“ mobiler Roboter von einer übergeordneten Instanz erhält. Auch sollte die Möglichkeit von Interaktionen menschlicher Operateure in die Missionsausführung betrachtet werden. Ebenfalls sollte eine besondere Betrachtung für Teams aus mobilen Fahrzeugen ausgeführt werden, da in diesem Fall die beschriebenen Probleme besonders deutlich werden: Einzelautonomie und Kooperation / Teamverhalten stehen im klaren Widerspruch zueinander. Ein neues Autonomiekonzept musste daher entwickelt und seine Praxistauglichkeit in verschiedenen Simulationen und praktischen Umsetzungen demonstriert werden.

Im 3. Kapitel wurde das Konzept der Bioorientierten Adaptiven Autonomie (BAA) neu entwickelt, um die zuvor genannten Anforderungen umzusetzen.

Die Neuartigkeit dieses Prinzips besteht in der Abkehr vom traditionellen, starren Verständnis des Begriffs „Autonomie“ (System ist entweder autonom oder nicht). Stattdessen wird einem mobilen System ein Autonomiegrad zugewiesen, der in einem festgelegten Spektrum wertkontinuierlich oder in fest definierten Abstufungen variieren kann. Dabei kann für ein System in Abhängigkeit einer bevorstehenden Mission ein bestimmter Autonomiegrad festgesetzt werden. Zusätzlich kann dieser Autonomiegrad während der Missionsausführung mittels eines Adapters ständig verändert werden. Dadurch kann im Rahmen der BAA jede der betrachteten Realisierungen eines mobilen Systems von ferngesteuert bis vollautonom beschrieben werden. Darüber hinaus erlaubt die Adaptierbarkeit, den Autonomiegrad an die aktuelle Situation und die jeweilige Aufgabe anzupassen. Dies gestattet ein schnelles Reagieren auf die lokalen Gegebenheiten.

Die zuvor aufgeworfenen Fragen nach der Nutzung externer Daten durch ein autonomes mobiles System, der Einbeziehung eines menschlichen Bedieners und der Realisierung von Gruppen mobiler Systeme wurden mit Hilfe der BAA umfassend beantwortet. So ist es unproblematisch, wenn ein System Daten einer externen Rechnerinstanz erhält. Dadurch ist eine Nutzung externer Datenbanken oder das Abgeben rechenintensiver Aufgaben durch das mobile System an einen externen Basisrechner problemlos möglich. Nach dem Konzept der BAA operiert das jeweilige System lediglich in einem geringeren Autonomiegrad als ein anderes System, welche alle Berechnungen auf der eigenen Rechnerhardware ausführt.

Es soll nochmals daraufhingewiesen werden, dass ein System mit hohem Autonomiegrad dabei nicht innovativer oder von besserer technischer Ausstattung sein muss. Oftmals wird ein hoher Autonomiegrad von den jeweiligen Gegebenheiten eingefordert und ist eher negativ. So können autonome Unterwasserfahrzeuge etwa in den meisten Fällen aufgrund fehlender bzw. (noch) nicht vorhandener Ausstattung nicht mit einer lokalen Basisstation kommunizieren. Auch globale Navigationssysteme wie GPS stehen unter Wasser nicht

zur Verfügung. Somit müssen entsprechende Systeme in einem hohen Autonomiegrad operieren, obwohl dies im Vergleich zu landgestützten Systemen eher nachteilig ist. Gerade bei Landsystemen charakterisiert den höchsten Autonomiegrad im Allgemeinen ein Zustand, in dem sich das System bei Ausfall etwa der Kommunikationsverbindung befindet und der keineswegs optimal ist. Die BAA erlaubt, bereits im Vorfeld einer Mission verschiedene Autonomiegrade zu definieren und während der Ausführung jeweils den optimalen Zustand zu wählen.

Klassische Autonomiekonzepte schließen meist einen Eingriff eines menschlichen Bedieners in die Missionsausführung aus. Auch in der Vorstellung von weiten Teilen der Bevölkerung dominiert das von Science Fiction und Medien geprägte Konzept, dass mobile Systeme in naher Zukunft komplexeste Missionen im Bereich Aufklärung, Überwachung und persönliche Dienstleistungen vollkommen selbständig, also ohne menschliche Überwachung oder Steuerung, ausführen können. Dazu muss jedoch angemerkt werden, dass für entsprechende Realisierungen noch unzählige Basistechnologien nicht zur Verfügung stehen und auch in absehbarer Zeit nicht mit der nötigen Robustheit umsetzbar sind. Zwar können heutige Computer im Rahmen von algorithmisch formulierbaren Problemstellungen deutlich exaktere und schnellere Resultate erzielen als ein Mensch. Allerdings erreichen Computer gegenwärtig nur Bruchteile der menschlichen Fähigkeiten im kognitiven Bereich. Da es gegenwärtig keine Anzeichen dafür gibt, dass sich dieser Umstand innerhalb der nächsten zehn Jahre grundlegend ändern wird, muss ein Autonomiekonzept, welches besonders in industriellen und/oder sicherheitsrelevanten Aufgabenstellungen zum Einsatz kommen soll, den Eingriff eines Menschen zulassen und klassifizieren können. Dies ist im Rahmen der BAA möglich. Der Autonomiegrad eines Systems kann beliebig weit abgesenkt werden, um menschliche Eingriffe bis hin zur völligen Fernsteuerung eines Systems zu erlauben. Dabei kann ein solcher Eingriff durch den Operateur veranlasst

werden, der die Missionsausführung überwacht und bei Bedarf eingreift. Ebenso kann ein entsprechender Eingriff aber auch vom mobilen System gefordert werden, welches dann seinen eigenen Autonomiegrad selbständig absenkt, wenn es in einer bestimmten Situation nicht zur selbständigen Aufgabenlösung in der Lage ist. Angeforderte Eingriffe des Operators können dabei durch das mobile System verifiziert werden, was besonders im sicherheitstechnischen Bereich erforderlich ist, um unbefugte Einflussnahme auszuschließen. Versagt die Verifizierung, kann das mobile System den Eingriff zurückweisen. Es erhöht dann seinen Autonomiegrad und lehnt jede Einflussnahme ab. Eine ähnliche Vorgehensweise ist auch denkbar, wenn die Handlungsfähigkeit eines verifizierten Bedieners anzuzweifeln ist (etwa durch Müdigkeit, Drogen etc.).

Prinzipiell kann also auch einem menschlichen Operator eine Art „Autonomiegrad“ zugeordnet werden, welchen er eigenständig verändern kann bzw. der von der Software an die gegebene Situation angepasst wird. Auch an dieser Stelle soll nochmals daraufhin gewiesen werden, dass das Ziel einer Entwicklung nicht ein möglichst hoher, sondern ein optimal angepasster Autonomiegrad sein sollte. Damit ein Mensch ein mobiles System über eine große Entfernung steuern kann, müssen technische Herausforderungen im Bereich Kommunikation und Mensch-Maschine-Schnittstelle gelöst werden. Teleoperierbarkeit ist damit kein Makel, sondern eine besondere Fähigkeit.

Das vorgeschlagene Konzept erlaubt damit ausdrücklich eine Interaktion zwischen Bediener und mobilem System, welche nach genau definierten Regeln abläuft. Dies ist besonders bei realen Anwendungen unablässig, da für jede Aktion die juristische Verantwortung klar definiert sein und bei einem Menschen liegen muss. Weiterhin lassen sich dennoch alle klassischen Motive für den Einsatz autonomer mobiler Systeme realisieren. Der Mensch kann geschützt werden, da er sich nicht selbst in eine gefährliche Situation begeben muss, sondern aus sicherer Entfernung mit dem System kommunizieren kann. Langweilige und eintönige Arbeit kann bis zu einem gewissen Grad vom mobilen System übernommen werden. Der Mensch wird nur dann aktiv, wenn dies

erforderlich ist. Auch personelle Einsparungen sind prinzipiell denkbar, auch wenn zunächst auf einen menschlichen Operateur nicht vollständig verzichtet wird. Ein Operateur kann unter Umständen mehrere mobile Systeme überwachen, und jedes System kann je nach Situation wiederum die Aufgaben mehrerer Personen übernehmen.

Seine besondere Leistungsfähigkeit zeigt dieses neu entworfene Konzept bei der Realisierung von Fahrzeugteams. Es ist in der Lage, den beschriebenen Widerspruch zwischen „Autonomie des Einzelnen“ und „Kooperation im Team“ aufzulösen. Teamhierarchien können aufgrund des adaptiven Charakters des Konzeptes ständig verändert und angepasst werden. Dadurch können, wie schon bei der Autonomie des Einzelsystems, unterschiedliche Konzepte zur Realisierung von Fahrzeugteams umgesetzt werden. Es wurde der Begriff „Teaminstanz“ eingeführt als abstraktes Verständnis für die Ebene, welche zur Erlangung der Kooperation zwischen einzelautonomen Systemen verantwortlich ist. Dieser Teaminstanz wird ebenfalls ein Autonomiegrad zugewiesen, welcher im Grunde auch als „Kooperationsgrad“ interpretiert werden kann. Dieser Kooperationsgrad steht dabei im umgekehrten Verhältnis zu den Autonomiegraden der Einzelsysteme. Die Kooperation des Teams steigt, wenn die Autonomiegrade der einzelnen Systeme sinken. Dadurch wurde der beschriebene Widerspruch zwischen Kooperation und Autonomie gelöst.

Für die konkrete Realisierung von Fahrzeugteams wurden verschiedene Möglichkeiten im Rahmen der BAA aufgezeigt. Wie bereits die Zustände „ferngesteuert“ und „vollautonom“ zuvor als Bezeichnungen für die Ränder des gesamten Autonomiespektrums eingeführt wurden, konnte auch ein Teamautonomiespektrum mit den Randbezeichnungen „(voll) hierarchisch“ und „(voll) dezentral“ neu entworfen werden. Aus der Biologie wurden dafür die Begriffe „Rudel“ und „Schwarm“ übernommen. Wie bereits bei Einführung des Autonomiespektrums wurde auch für das Teamverhalten deutlich gemacht, dass für

Realisierungen jeweils optimale, an Situation, Aufgaben und einzelautonomen Fähigkeiten angepasste Stufen im Gesamtspektrum definiert werden müssen.

Zur leichteren Einordnung wurden typische Realisierungsmerkmale angegeben. So wurde herausgearbeitet, dass die Kommunikationsfähigkeit eine wesentliche Rolle bei der Einstufung spielt. Klare Hierarchien, bei denen bestimmte Teammitglieder bestimmte Entscheidungen zu treffen haben, lassen sich nur bei vorhandener guter Kommunikationsfähigkeit realisieren. Ohne die Möglichkeit zur direkten Kommunikation lassen sich keine Kommandos, sondern nur Hinweise übermitteln, etwa durch Landmarken, Manipulationen oder Duftstoffe. Somit kommt es bei den dezentralen Schwärmen eher zur Anwendung von Kontrollstrategien aus den Bereichen Stochastik/ Evolutionstheorie, um auf Basis der indirekten Kommunikation eine Quasi-Kooperation zu erreichen. Dieser Umstand resultiert im Allgemeinen im Bedarf einer höheren Anzahl an Fahrzeugen als im Rudel. Dabei ergibt sich die interessante Feststellung, dass gerade in Rudeln mit eher weniger Fahrzeugen mit guter technischer Ausstattung (Kommunikation, Navigation, einzelautonome Fähigkeiten) die Autonomiegrade der Einzelsysteme weiter abgesenkt werden können als in Schwärmen. Auch an dieser Stelle wird wieder deutlich, dass ein höherer Autonomiegrad nicht automatisch als bessere Lösung zu werten ist. In Teamrealisierungen sind im Gegenteil niedrigere Autonomiegrade der Einzelsysteme wünschenswert, da dadurch eine bessere Kooperation erreichbar ist.

Im Kapitel 4.6 wurden die Realisierungen Rudel und Schwarm gegenübergestellt und Wertungen über eine Eignung im praktischen Einsatz gegeben. Dabei wurde auf die Gefahren stochastikbasierter Kontrollstrategien hingewiesen, ebenso auf die Problematik des höheren Fahrzeugbedarfs. Für unmittelbar bevorstehende praktische Realisierungen wurde eine rudel-nahe Strategie vorgeschlagen, da die klar definierten Hierarchien sowohl eine Fehlersuche (Software-Debugging), als auch das Zuweisen einer juristischen Verantwortung erleichtern. Dabei müssen aber die bestehenden Möglichkeiten im Bereich

Kommunikation und Navigation durch weitere Forschungsaktivitäten noch verbessert werden. Ebenso wurde aber auch die Weiterführung der Forschung im Bereich dezentraler Teamstrategien empfohlen, da hier im mittel- bis langfristigen Zeitrahmen sehr gute Resultate zu erwarten sind (z.B. Einsatz unter Wasser / im Weltall mit einer Vielzahl kleiner, kostengünstiger Systeme).

Neben der Neuentwicklung des Konzeptes der Bioorientierten Adaptiven Autonomie wurden in dieser Arbeit verschiedene wissenschaftliche Methoden zum Entwurf der Steuerung autonomer mobiler Systeme als Einzelfahrzeuge wie auch in Teams angewandt und verglichen. Zur Realisierung des Adapters innerhalb des neuentwickelten Autonomiekonzeptes wurden einfache analytische Methoden vorgeschlagen (z.B. Bestimmung des Maximalwertes der Geschwindigkeit als Funktion des Autonomiegrades). Eine umfassende und leistungsstarke Umsetzung lässt sich durch netz-/ grafenbasierte Methoden erzielen. In Kapitel 4 wurde die vollständige Umsetzung einer Simulation von mehreren MauSI-Robotern beschrieben, welche vom Autor realisiert wurde. Ausgehend von Vorarbeiten am Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik erfolgte zunächst auf unterster Ebene die Modellierung eines MauSI-Systems inklusive IR-Sensormodell auf analytischem Weg. Darauf wurde ein zweistufiges regelbasiertes Steuerungskonzept aufgesetzt, welches den MauSI-Roboter zum einzelautonomen Verhalten und zum Finden eines Zieles in einer unbekannten Umgebung mit Hindernissen befähigte und einen Autopiloten zur direkten Steuerung enthielt. Durch Verbesserungen des Regelwerkes konnten auch komplexe Aufgaben gelöst werden, etwa die Flucht aus einem Raum. Die Hindernisvermeidung beruhte auf der Definition eines virtuellen Zieles durch die übergeordnete Steuerungsebene, welches bei einer Hindernisumgehung dem unterlagerten Steuerungssystem an Stelle des realen Zieles übergeben wird.

Auf diesem Steuerungskonzept aufbauend, wurde als Neuentwicklung ein Teamverhalten durch Aufsatz einer zentralen dritten Steuerungsebene im

Rahmen der BAA realisiert. Dabei blieb das Steuerungssystem zur Einzelautonomie auf jedem einzelnen System weitgehend erhalten. Die dritte Steuerungsebene gibt die Zielinformation an die zweite Ebene jedes Einzelsystems weiter und kann somit virtuelle Ziele zweiter Ordnung generieren. Damit bleibt die Verantwortung, eine Kollision mit einem Hindernis zu vermeiden, innerhalb der zweiten Steuerungsebene, und somit auf jedem Roboter. Auch bei Wegfall der Kommunikationsverbindung zur dritten Steuerungsebene bleibt die Hindernisvermeidung damit funktionell. Die dritte Ebene ist für die Erstellung und Aufrechterhaltung einer Formation verantwortlich, aber auch zur gezielten Formationsänderung bei Auftreten eines Hindernisses, um dem Team ein optimales Passieren zu ermöglichen. Diese dritte Steuerungsebene wurde grafenbasiert umgesetzt. In Abhängigkeit der aktuellen Positionen und Sensorwerte aller Systeme wird nach genau festgelegten Regeln der aktuelle Zustand „Formation OK“, „Formation nicht OK“ oder „Hindernisumgehung“ ausgewählt und entsprechende Zielvorgaben für die Systeme vorgenommen. Zusätzlich eingeführt wurde eine Priorität der Roboter untereinander, um die Vorfahrt im Falle einer drohenden Kollision zu regeln. Im Falle der Hindernisvermeidung wird nach bestimmten Regeln ein Führungsfahrzeug bestimmt, welches im erhöhten Autonomiegrad den Weg um das Hindernis herum erkundet, während die anderen Systeme folgen.

Zusätzlich zu der vorgestellten hierarchischen Realisierung eines Fahrzeugteams wurde auf eigene Arbeiten verwiesen, bei denen dezentrale Steuerungsansätze mit indirekter Kommunikation auf der Basis von Ameisenschwärmen simuliert wurden. Dabei wurde die indirekte Kommunikation sowohl durch Simulation von Pheromonen dargestellt, als auch durch eine Wahrscheinlichkeitstabelle, welche von einer zentralen Instanz in Abhängigkeit der Resultate der Einzelsysteme angepasst wurde. Die Einzelsysteme konnten dabei keine Nachrichten direkt untereinander austauschen. Dennoch konnte durch Strategien auf Grundlage der Stochastik / Evolutionstheorie eine Quasi-Kooperation erreicht werden. Der gesamte Schwarm als ganzes konnte die

gestellten Aufgaben, das Auffinden und Verbringen von Futterstoffen ins Nest sowie die optimale Wegfindung durch unbekanntes Gebiet mit der Zeit immer besser bewältigen. Dabei konnten durchaus Verluste von Einzelsystemen auftreten, was aufgrund der großen Anzahl und der Umsetzung als Simulation unproblematisch war. In der Realität muss auf entsprechende Gefahren geachtet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das neuentwickelten Konzeptes der BAA durch eine Reihe von Simulationen dargestellt. Schwerpunkt bildete dabei die in Kapitel 5.1 auf Grundlage der Ausführungen von Kapitel 4 vorgestellte Simulation eines MauSI-Rudels unter Einsatz von MATLAB /Simulink mit Darstellung in der Virtuellen Realität. Ebenso wurden mögliche zukünftige Anwendungen im Rahmen des Straßenverkehrs skizziert sowie die Grundlagen von Realisierungen im Unterwasserbereich vorgestellt. Letzteres stellt dabei die angestrebte Schnittstelle zur Praxis dar. Konkrete Umsetzungen an Land stehen bis zum Zeitpunkt noch aus. Die beschriebenen Probleme in Kommunikation, Navigation und Umgebungserfassung führten dazu, die MauSI-Systeme als Demonstrations-Plattform für Teamverhalten nicht weiter realisiert wurden. In der entsprechenden Größenordnung standen zu wenig COTS-Komponenten in ausreichender Qualität zur Verfügung. Entsprechend wurde die Umsetzung auf dem Robotersystem ASTro forciert. Hier wurden bisher verschiedene Untersuchungen über die Eignung unterschiedlicher Komponenten vorgenommen. Eine endgültige Realisierung scheiterte bisher am Fehlen ausreichender finanzieller und personeller Ressourcen.

Damit wird die erste praxisnahe Realisierung des Konzeptes der BAA im Bereich der maritimen Systeme erfolgen. Im Rahmen des Europäischen Forschungsprojektes GREX [Gre07], welches gegenwärtig unter Mitarbeit des Autors am Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik bearbeitet wird, wird bis Mitte 2009 die erste industriell nutzbare Umsetzung realer unbemannter maritimer Fahrzeuge über und unter Wasser mit Teamverhalten erfolgen.

Das Projekt wurde in Kapitel 6.1.2 vorgestellt. Besonders in der maritimen Umgebung mit eingeschränkter Kommunikationsfähigkeit und nicht vorhandener globaler Navigation im Unterwasserbereich kann das Konzept der BAA seine Qualitäten einbringen, durch Adaption der Autonomiegrade jedes System optimal nach vorliegender Situation und Aufgabe in das Team einzubinden. Durch Teilnahme entsprechender Partner stehen verschiedene unbemannte maritime Fahrzeuge zur Verfügung, welche bereits über fortschrittliche einzelautonome Fähigkeiten verfügen. Auf dieser Grundlage werden verschiedene teamorientierte Szenarien umgesetzt, und neue Erkenntnisse über Teamverhalten können abgeleitet werden.

Als Ausblick stehen weitere Forschungsaktivitäten im Themengebiet der mobilen Robotik und der unbemannten Fahrzeuge an den Forschungsinstitutionen Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik der Technischen Universität Ilmenau sowie dem Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik Ilmenau. Dabei können folgende Schwerpunkte für weiterführende Forschungstätigkeiten genannt werden:

- Realisierung des ASTro als geeigneten Systemdemonstrator für adaptive Anwendungen; dabei Berücksichtigung der Möglichkeiten zur Erforschung von Verbesserungen im niederautonomen Bereich (Teleoperation, Mensch-Maschine-Schnittstelle).
- Umsetzung der ersten industriell nutzbaren Anwendung für Teams aus unbemannten maritimen Fahrzeugen zusammen mit anderen Partnern im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes GREX.
- Verfeinerung des Konzeptes der Bioorientierten Adaptiven Autonomie im Hinblick auf die Einordnung unterschiedlicher Komplexitäten der zulässigen autonomen Handlungen (Erweiterung des Konzeptes in die dritte Dimension).

- Entwurf von innovativen Technologien im Bereich der Sensortechniken, etwa zur Lokalisierung oder zur Hindernisvermeidung, auf Basis von Sensordatenfusion.
- Überführung von Technologien aus dem Themenbereich in Anwendungen im Rahmen von Assistenzsystemen für Personen bei der Führung von Kraftfahrzeugen.

Literaturangaben

- [AA01] Altenburg, J.; Altenburg, U.: Roboter mit Köpfchen. In: *Elektronik* 22/2001, S. 54-58.
- [ADK05] Abel, R.O.; Dasgupta, S.; Kuhl, J.G.: Coordinated fault-tolerant control of autonomous agents: geometry and communications architecture. In: *Proceedings of the 16th IFAC World Congress*, Prag, Tschechische Republik, Juli 2005.
- [AGW02] Altenburg, J.; Glotzbach, T.; Wernstedt, J.: Methoden zur Detektion und Vermeidung von Hindernissen in der mobilen Robotik. *Symposium „Unmanned Ground Vehicles“ des Bundesamtes für Wehrtechnik und Beschaffung (BWb)*, Mannheim, Dezember 2002.
- [Ark01] Arkin, R.: Tasking and Execution in Multiagent Robotic Teams. *Keynote Lecture at LASTED International Conference Robotics and Applications (RA 2001)*, Tampa, Florida, USA, November 2001.
- [Atl+04] Atlas Elektronik GmbH, Technische Universität Ilmenau, Universität Würzburg, Götting KG: TEAM – Kooperierende Autonome Systeme. Forschungsantrag beim Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2004.
- [Atl+05] Atlas Elektronik GmbH, Technische Universität Ilmenau, Cybernetix SA, Ifremer, Innova S.p.A, MC Marketing Consulting, See-Byte Ltd., Instituto Superior Tecnico (IST) - Lab: Institute for Systems and Robotics (ISR), Centre of IMAR at Department of Oceanography and Fisheries at the University of the Azores, SCIENT: GREX: Coordination and control of cooperating heterogeneous unmanned systems in uncertain environments. Project proposal for a Specific Targeted Research or Innovation Project

within the Sixth Framework Programme of the Information Society Technologies (IST), 2005.

- [Ban+06] Bannasch, R., Kebkal, K. G., Yakovlev, S., Kebkal, A: Fast and Reliable Underwater Communication: Successful Applications of Biologically Inspired Techniques. In: *Proceedings of the 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (O-MAE2006)*, Hamburg, Juni 2006.
- [Biz+02] Bizzi, E.; Tresch, M.; Saltiel, P.; d'Avella, A.: Coordination and localization in spinal motor systems. *Brain Research Reviews* 40, 2002, S. 66–79.
- [Bri+04] Brigney, B et. al.: Defence R&D Canada's Autonomous Intelligent Systems Program. *Proceedings of SPIE* Vol. 5422, SPIE, Bellingham, USA, 2004.
- [Bro86] Brooks, R.A.: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot. In: *IEEE Journal Robotics and Automation* 1(1):1–10, 1986.
- [Brü02] Brückner, I.: Simulation von Bewegung und Steuerung des autonomen mobilen Robotersystems MauSI 2 in virtuellen Räumen. *Diplomarbeit der Technischen Universität Ilmenau*, 2002.
- [Byr93] Byrnes, R.B.: The Rational Behavior Model: A Multi-Paradigm, Tri-level Software Architecture for the Control of Autonomous Vehicles. *PhD Dissertation of the Naval Postgraduate School, Monterey, California*, 1993.
- [CAR09] CARMEN Robot Navigaton Toolkit, Homepage des Projektes CARMEN, <http://carmen.sourceforge.net/home.html>, Stand: 10.01.2009
- [Cap02] Capek, K.: *R.U.R. (Rossum's Universal Robots)*. Players Pr, 2002.

- [Con06] Conrad Electronic Website, Produktinformation zu GPS-Gerät Alan Map 500; http://www2.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/825000-849999/849380-in-01-de-GPS-Geraet_Alan_MAP_500.pdf. Stand: 01.02.2006.
- [Dar05] Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA): Grand Challenge 2004, Final report. *Technical report*, DARPA, Arlington, USA. Website: <http://www.darpa.mil/body/NewsItems/pdf/DGCreport30July2004.pdf>, Stand: 01.02.2005.
- [Dar07a] Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA): Urban Challenge 2007, DARPA, Arlington, USA. Website: <http://www.darpa.mil/grandchallenge/docs/ucwinnertrt.pdf>, Stand: 04.11.2007.
- [Dar07b] Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA): Grand Challenge 05. Website: <http://www.darpa.mil/grandchallenge05/>, zuletzt aktualisiert: 31.12.2007
- [DDCS02] Dorigo, M.; Di Caro, G.; Sampels, M.: Ant Algorithms. In: *Proceedings of the Third International Workshop ANTS 2002*, Brüssel, Belgien, September 2002, Springer Berlin 2002.
- [Dic05] Dickmanns, E.D.: Road vehicle eyes for high precision navigation. In: Linkwitz et al. (Hrsg.): *High Precision Navigation*, Dümmler Verlag, Bonn, 1995, S. 329-336.
- [DMC96] Dorigo, M.; Maniezzo, V.; Colorni, A.: The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B*, Vol.26, No.1, 1996, S. 1-13.

- [Edl97] Edlinger, T.: Hierarchische Steuerung für einen mobilen Roboter zur autonomen Erkundung seiner Einsatzumgebung. *VDI-Fortschrittbericht* Reihe 8 Nr. 638, VDI-Verlag Düsseldorf, 1997.
- [Eic04] Eichhorn, M.: An Obstacle Avoidance System for an Autonomous Underwater Vehicle. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Symposium on Underwater Technology*, Taipeh, Taiwan, April 2004.
- [Eic07] Eichhorn, M.: Intelligentes Führungskonzept für ein Autonomes Unterwasserfahrzeug in Sondersituationen. *Dissertation der Fakultät für Informatik und Automatisierung der Technischen Universität Ilmenau*, 2007.
- [EKS95] Eisenhardt, P.; Kurth, D.; Stiehl, H.: *Wie Neues entsteht. Die Wissenschaften des Komplexen und Fraktalen*. Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbeck, 1995.
- [ES05] Elkaim, G.; Siegel, M.: Lightweight Control Methodology for Formation Control of Vehicle Swarms. In: *Proceedings of the 16th IFAC World Congress*, Prag, Tschechische Republik, Juli 2005.
- [Ewa05] Ewald, R.: Kooperierende Roboter mit Bewegungsbeobachter: Simulation eines Ballwurfes auf ein bewegtes Ziel. *Diplomarbeit der Technischen Universität Ilmenau*, 2005.
- [Fru03] Frühling, R.: Erweiterung und Verbesserung der Infrarotsensorumsetzung im Simulationsmodell des autonomen Robotersystems „MauSI 2“. *Projektarbeit der Technischen Universität Ilmenau*, 2005.
- [FSA04] Fachgebiet Systemanalyse an der Technischen Universität Ilmenau; Modellierung, Regelung und Navigation von ferngesteuerten Unterwasserfahrzeugen; Website: <http://www.tu-ilmenau.de/site/systemanalyse/secbaer.1890.0.html>; Aktualisierungsdatum: 16.12.2004.

- [FSA06] Fachgebiet Systemanalyse an der Technischen Universität Ilmenau; DeepC - Ein Autonomes Unterwasserfahrzeug; Website: <http://www.tu-ilmenau.de/fakia/deepc.1888.0.html> ; Aktualisierungsdatum: 11.05.2006.
- [FSA09] Fachgebiet Systemanalyse an der Technischen Universität Ilmenau; Beispiele aus Kapitel 5 der vorliegenden Dissertationsschrift, Website: http://wcms1.rz.tu-ilmenau.de/fakia/fileadmin/template/startIA/sanalyse/div/diverses/Beispiele_zur_Steuerung_von_Roboterteams.zip , Aktualisierungsdatum: 12.02.2009.
- [Gha+05] Ghabcheloo, R.; Pascoal, A.; Silvestre, C.; Carvalho, D.: Coordinated Motion Control of Multiple Autonomous Underwater Vehicles”, *The International Workshop on Underwater Robotics*, Genua, Italien, 2005.
- [GKW03] Glotzbach, T.; Kopfstedt, T.; Wernstedt, J.: Simulation von Rudelverhalten autonomer Systeme. *Forschungsbericht der Technischen Universität Ilmenau*, 2003, unveröffentlicht.
- [Glo03] Glotzbach, T.: Autonomous navigation of the mobile robots ‘MauSI 2’ through unknown environments in single and in swarm mode. In: *Proceedings of the FIRA Robot World Congress 2003*, Wien, Österreich, Oktober 2003.
- [Glo04a] Glotzbach, T.: Adaptive Autonomy: A suggestion for the definition of the notation ‘Autonomy’ in mobile robotics. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications, IEEE International Symposium on Computer-Aided Control Systems Design, IEEE International Symposium on Intelligent Control CCA/ISIC/CACSD’04*, Taipeh, Taiwan, September 2004, S. 922-927.
- [Glo04b] Glotzbach, T.: Autonomie mobiler Roboter unter den Aspekten Gesamtmission und Informationsfluss bei Roboterschwärmen un-

- terschiedlicher Größe. In: Conference Proceedings Volume 1 des 49. Internationalen Wissenschaftlichen Kolloquiums der Technischen Universität Ilmenau (IWK), Ilmenau, September 2004, S. 151-156.
- [Glo05] GlobalSecurity.org ; Website;
<http://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/fcs.htm>.
 Stand: 15.11.2005.
- [Glo06] Glotzbach, T.: Ein Beitrag zur Entwicklung von Strategien zur Missions- und / oder Manöverführung mobiler Systeme in Schwärmen. 40. Regelungstechnisches Kolloquium, Boppard, Februar 2006.
- [Glo+07] Glotzbach, T., Picini, A., Zangrilli, A., Eichhorn, M., Otto, P., Schneider, M.: Evaluation of Different Control Strategies for Teams of Unmanned Marine Vehicles (UMVs) Comparing the Requirements of Underwater Communication and Navigation in MATLAB® Simulations. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT)*, Cortona, Italien, April 2007, S. 331-344.
- [Gra04] Grahle, T.: Kooperierende Zielsuche und Umgebungserkennung in dynamischen Umgebungen. *Diplomarbeit der Technischen Universität Ilmenau*, 2004.
- [Gra59] Grassé, P.P.: La reconstruction du nid et les coordinationsinterindividuelles chez. *Bellicositermes natalensis* et *Cubitermes* sp. La théorie de la stigmergie: Essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs. *Insectes Sociaux*, 6, 1959.
- [Gre07] GREX: Coordination and control of cooperating heterogeneous unmanned systems in uncertain environments, IST-Project-No. 035223, Website: <http://www.grex-project.eu/>; Stand: 26.06.2007.

- [Gro+89] Gross, S., Aron, S., Deneubourg, J.-L., Pasteels, J. M.: Selforganized shortcuts in the Argentine ant. *Naturwissenschaften*, 76, 1989.
- [Gus06] Guß, C.: Entwicklung von Algorithmen für ein globales Indoor-Lokalisationssystem auf Ultraschall-Basis. *Studienarbeit der Technischen Universität Ilmenau*, 2006.
- [GW02] Grillner, S.; Wallén, P.: Cellular bases of a vertebrate locomotor system – steering, intersegmental and segmental co-ordination and sensory control. *Brain Research Reviews* 40, 2002, S. 92–106.
- [GW06] Glotzbach, T.; Wernstedt, J.: A Proposal for the Control of Teams of Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) in Hierarchical and Peripheral Modes Using the Concept Of Adaptive Autonomy. In: *Proceedings of the 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE)*, Hamburg, Juni 2006.
- [Hol04] Holzapfel, S.: Missionsmanagement eines großen autonomen Roboterschwarmes durch Evolutionsstrategien. *Diplomarbeit der Technischen Universität Ilmenau*, 2004.
- [Iro05] iRobot Corporation, Website; <http://www.irobot.com/sp.cfm?pageid=109>. Stand: 21.11.2005.
- [Jac03] Jaczkowski, J.: Robotic follower experimentation results: ready for FCS increment I. *Unmanned Ground Vehicle Technology V, Proceedings of SPIE*, Vol. 5083, 2003.
- [Joh01] Johnson, S.: *Emergence*. Scribner, New York, 2001.
- [KF03] Kuhn, T.; Frank, M.: Anwendungsspektrum und Steuerungsmethoden Taktischer Mobiler Kleinroboter. *Symposium „Robotik – Unmanned Ground Vehicles“ des Bundesamtes für Wehrtechnik und Beschaffung (BWB) & des Heeresamtes Abteilung III*, Koblenz, November 2003.
- [KKW96] Koch, M.; Kuhn, Th.; Wernstedt, J.: *Fuzzy Control*. Oldenbourg Verlag, München, 1996.

- [Kla+04] Klaaßen B.; Delipetkos, E.; Hertzberg, J.; Kilian, A.; Linnemann, R.; Nüchter, A.; Rome, E.; Streich, H.; Wolf, H.-L.; Worst, R.; von Zedlitz, C.: Landbasierte mobile Roboter, Stand der Technik und Trends; *Fraunhofer Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (INT)* (Hrsg.) *im Auftrag des Bundesministeriums der Verteidigung, Referat Rü IV 2*, Juni 2004.
- [KMB92] Kwak, S.H.; McGhee, R.B.; Bihari, T.E.: Rational Behavior Model: A Tri-level Multiple Paradigm Architecture for Robot Vehicle Control. *Technical Report NPSCS-92-003*, Naval Postgraduate School, Monterey, USA, März 1992.
- [KW96] Kuhn, Th.; Wernstedt, J.: Controlling of Autonomous Robot System with Fuzzy Techniques. In: *Proceedings of the 13th IFAC World Congress*, San Francisco, USA, 1996, S. 247-252.
- [Mas02] Mason, Z.: Programming with Stigmergy: Using Swarms for Construction. *Artificial Life VIII*, MIT Press, 2002, S. 371-374.
- [Mey04] Meyer, F.C.: Optimale Wegfindung teilautonomer mobiler Roboter in unbekannten Umgebungen durch intelligente Strategien. *Studienjahresarbeit der Technischen Universität Ilmenau*, 2004.
- [Mit06] M. I. T. Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory, Website des Cricket Lokalisationssystems; <http://cricket.csail.mit.edu/>. Stand 01.02.2006.
- [Möl+05] Möller T.; Kraft, H.; Frey, J.; Albrecht, M.; Lange, R.: Robust 3D Measurement with PMD Sensors, In: *Proceedings of the First Range Imaging Research Day at ETH Zurich*, 2005, abrufbar unter <http://www.pmdtec.com/inhalt/download/documents/RIM2005-PMDTec-Robust3DMeasurements.pdf>, Stand: 10.01.2009
- [NES95] Nagel, H.-H.; Enkelmann, W.; Struck, G.: FhG-Co-Driver: From map-guided automatic driving by machine vision to a cooperative

- driver support. *Mathematical and Computer Modelling*, 22, 1995, S. 185-212.
- [Nil84] Nilsson, N.J.: Shakey the robot. *SRI International, Tech.Rep. TN~323*, April 1984.
- [Pfü05] Pfützenreuter, T.: Intelligentes Missionsmanagement für Autonome Mobile Systeme. *Dissertation der Fakultät für Informatik und Automatisierung der Technischen Universität Ilmenau*, 2005.
- [Pre03] Preiß, A.: Autonomes mobiles Robotersystem „MauSI 2“: Missionsplanung und –durchführung in durch Kameraaufklärung bekannten Welten. *Diplomarbeit der Technischen Universität Ilmenau*, 2003.
- [Rem09] Northrop Grumman Mission Systems – Remotec ANDROS F6A Heavy Duty Robot. Website: <http://www.ms.northropgrumman.com/Remotec/f6a.htm>, Stand: 12.02.2009
- [Rey87] Reynolds, C.: Flocks, birds and schools: A distributed behavioral model. *Comput. Graph.*, 21, 1987, S. 25-34.
- [Rob05] Robowatch; Produktbeschreibung Ofro; Website: <http://www.robowatch.de:8080/home/de/outdoor.jsp>. Stand: 21.11.2005.
- [Sch+00] Schmidt, R.; Weisser, H.; Schulenberg P.J., Göllinger, H.: Autonomous driving on vehicle test tracks: overview, implementation and results. In: *Proceedings of the IEEE Conference Computer Vision Pattern Recognition*, 2000.
- [Sch05] Schröter, A.: Missionsmanagement von großen autonomen Roboterschwärmen in unterschiedlichen dreidimensionalen virtuellen Realitäten. *Diplomarbeit der Technischen Universität Ilmenau*, 2005.
- [Sch97] Schilling, K.: Control Aspects of Planetary Rovers. *Control Engineering Practice* 5, 1997, S. 823-825.

- [Sch+97] Schilling, K.; Richter, L.; Bernasconi, M.; Jungius, C.; Garcia-Marirrodiga, C.: Operations and Control of the mobile instrument deployment device on the surface of Mars. *Control Engineering Practice* 5, 1997, S. 837-844.
- [SD94] Schiehlen, J.; Dickmanns, E.D.: Design and control of a camera platform for machine vision. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Robots and Systems*, München, September 1994, S. 2058-2063.
- [SFG08] Stachniss, C.; Frese, U.; Grisetti, G.: OpenSLAM. Website: <http://www.openslam.org>, Stand: 11.11.2008
- [Sie+92] Siegle, G.; Geisler, J.; Laubenstein, F.; Nagel, H.-H.; Struck, G.: Autonomous driving on a road network. In: *Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium IVS '92*, Detroit, USA, Juni/July 1992, S. 403-408.
- [SKW95] Schmidt, P.; Kuhn, Th.; Wernstedt, J.: Steuerung eines low cost Roboters mittels Fuzzy Logik. *5. Workshop Fuzzy Control*, Dortmund, November 2005.
- [Smi95] Smithers, T.: On quantitative Performance Measures of Robot Behavior: The Biology and Technology of Intelligent Autonomous Systems. *J. Rob.&Aut.Syst.* 15, 1995, S. 107-135.
- [SPS04] Schaub, G.; Pfendner, A.; Schaefer, C.: PRIMUS: autonomous navigation in open terrain with a tracked vehicle. *Proc. SPIE Vol. 5422*, p. 156-165, Unmanned Ground Vehicle Technology VI, 2004
- [SR05] Staudenmeir, M.; Raphelt, M. (Hrsg. Diehl BGT Defence): Modulare Gefechtsfeldrobotik, Konzeptstudie und Schnittstellen; Buch 3: Konsolidierung; *Studie im Auftrag des Bundesamtes für Wehrtechnik und Beschaffung (BWB)*, 2005.

- [SRR00] Schilling, K.; Roth, H.; Rösch, O.: Sensordatenfernerfassung und Fernsteuerung von Maschinen über das Internet. *Jahrestagung des Siemens Automatisierungskreises*, Konstanz, 2000.
- [Sti+00] Stiller, C.; Hipp, J.; Rössig, C.; Ewald, A.: Multisensor obstacle detection and tracking. *Image and Vision Computing Journal*, 18(5), April 2000, S. 389-396.
- [Sti+05] Stiller, C. (als Sprecher des SFB): Antrag auf Einrichtung und Finanzierung des Sonderforschungsbereichs/Transregio 28 „*Kognitive Automobile*“ an die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) durch die Universität Karlsruhe (TH); Fraunhofer Institut IITB, Karlsruhe; Technische Universität München; Universität der Bundeswehr München; Juli 2005.
- [Thr+00] Thrun, S.; Fox, D.; Burgard, W.; Dellaert, F.: Robust Monte Carlo Localization for Mobile Robots, *Artificial Intelligence*, volume 128, numbers 1-2, 2000
- [Thr02] Thrun, S: Robotic Mapping: A Survey, in: G. Lakemeyer and B. Nebel (Hrsg.), *Exploring Artificial Intelligence in the New Millenium*, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 1. Auflage 2002
- [TSF3] Technische Universität Ilmenau, system engineering GmbH Ilmenau, Fraunhofer IITB Application Center System Technology Ilmenau: „Fuzzy Control Design Toolbox for use with MATLAB®“, *User's Guide*, Version 3.
- [Tzu06] Tsuno, A.: Projekt: Mobiles Robotersystem ASTro. *Praktikumsbericht der Technischen Universität Ilmenau über die Tätigkeit beim Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik Ilmenau*, 2006.
- [Vas+04] Vasseur, L.; Lecointe, O.; Dento, J.; Cherfaoui, N.; Marion, V.; Morillon, J.: Leader-follower function for autonomous military

- convoys. In: *Proceedings of SPIE* Vol. 5422, SPIE, Bellingham, USA, 2004.
- [Wei99] Weiss, G. (Hrsg.): *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*, MIT Press, 1999.
- [Wet03] Wetterling, F.: Positionsbestimmung eines mobilen teilautonomen Roboters in der Ebene mit einem Beschleunigungssensor. *Studienjahresarbeit der Technischen Universität Ilmenau*, 2003.
- [WG03] Wernstedt, J.; Glotzbach, T.: Teilautonomie – Einbindung und Entlastung des Menschen bei der Führung mobiler Systeme. *Symposium „Robotik – Unmanned Ground Vehicles“ des Bundesamtes für Webrtechnik und Beschaffung (BWB) & des Heeresamtes Abteilung III*, Koblenz, November 2003.